

A FÍSICA NO BRASIL NA PRÓXIMA DÉCADA

FÍSICA NUCLEAR
FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS
PROJETOS INTERDISCIPLINARES



**A FÍSICA NO BRASIL
NA PRÓXIMA DÉCADA**

**FÍSICA NUCLEAR
FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS
PROJETOS INTERDISCIPLINARES**

**Sociedade Brasileira de Física
1990**

530.0981 Sociedade Brasileira de Física

s678f

A Física no Brasil na Próxima Década.
São Paulo, Sociedade Brasileira de Física,
Instituto de Física da USP, 1990.

pt. illus:

Conteúdo: pt.1-Física da Matéria Con
densada; pt.2-Física Nuclear, Física de
Partículas e Campos e Projetos Interdis
ciplinares.

Física - História - Brasil

Física - Investigações

t

PUBLICAÇÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Diretoria 1987/1989

Gil da Costa Marques
Nelson Studart Filho
Henrique Lins de Barros
Adalberto Fazzio
Wido H. Scheiner
Suzana de Souza Barros

Diretoria 1989/1991

Gil da Costa Marques
Nelson Studart Filho
José D'Albuquerque e Castro
Adalberto Fazzio
Wido H. Schreiner
Ana Ma. Pessoa de Carvalho

Presidente
Vice-Presidente
Secretário Geral
Secretário
Tesoureiro
Secretária para Assuntos de Ensino

COMISSÃO COORDENADORA

Gil da Costa Marques (Coordenador Geral)

Sergio M. Rezende

Oscar Sala

Carlos O. Escobar

Iberê L. Caldas

Cid B. Araujo

Paulo M. Bisch

Suzana de Souza Barros

Fernando C. Zawislak

Subvencionada por

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico



Financiadora de Estudos e Projetos



REVISÃO E DIAGRAMAÇÃO

Fernando Luiz C. S. Braga
Laura Junqueira Caldas

DATILOGRAFIA

Maria da Graça Braga

CAPA

Marcelo R. Gussóni

COMISSÃO DE FÍSICA NUCLEAR

Alejandro Szanto de Toledo
Alexandre Motta Borges
Alinka Lépine-Szily
Antonio Fernando R. T. Piza
Carlos Augusto Bertulani
Hélio Dias
Luiz Felipe Canto
Mahir Saleh Hussein
Marcos Nogueira Martins
Oscar Sala (Coordenador)
Solange Barros

COMISSÃO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS

Carlos O. Escobar (Coordenador)
Erasmio M. Ferreira
Armando Turtelli Jr.
Marcelo O. C. Gomes
Adilson J. da Silva
Miguel Luksys
Jôao Carlos dos Anjos

COMISSÃO DE PROJETOS INTERDISCIPLINARES

Fernando Zawislak (Coordenador)

ÍNDICE

FÍSICA NUCLEAR

1.A Física Nuclear	1
2.Fronteiras Internas e Externas da Física Nuclear	8
3.Ligações da Física Nuclear com Outras Áreas	15
4.Física Nuclear no Brasil: Situação Atual e Perspectivas	17
5.Prioridades Recomendadas para Física Nuclear	70

FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS

1.A Física de Partículas Elementares	81
2.Teoria Quântica dos Campos	101
3.A Física da Radiação Cósmica	109
4.Grupos Experimentais: Situação Atual e Perspectivas	122
5.Dados Sobre Grupos de Pesquisa	127

PROJETOS INTERDISCIPLINARES

1.Introdução	137
2.O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron	137
3.Fábrica de Mésons	163
4.Expansão do Laboratório de Implantação Iônica	170

APRESENTAÇÃO

O projeto "A Física no Brasil na Próxima Década", cujo resultado é agora tornado público, foi concebido pela Diretoria da Sociedade Brasileira de Física em 1987. Ao longo de quase três anos promovemos amplas discussões com a comunidade científica tendo obtido, de uma parte apreciável da mesma, amplo apoio. Recebemos, de um grupo de mais de 50 físicos atuantes nas suas áreas de pesquisa, não só apoio, mas eficiente colaboração na elaboração dos textos depois de executarem o árduo trabalho de coligir e analisar os dados referentes à Física Brasileira.

O documento contém um quadro atualizado da situação da Física no Brasil hoje, completando assim, o documento anterior da SBF "A Física no Brasil", publicado em 1987, e se propõe a encerrar, acima de tudo, uma orientação prospectiva. Procura apresentar a Física que projetamos para o Brasil amanhã. Pretendeu-se assim, que a comunidade científica e a sociedade em geral tomasse conhecimento e refletisse a respeito dos seguintes tópicos:

- . As direções que as diversas áreas da Física deverão tomar no Brasil e as justificativas para um tal direcionamento.
 - . Os projetos de cada área, independentemente do custo, e que tenhamos competência para realizar.
 - . As necessidades, em termos de recursos humanos, para a realização deste projetos.
 - . O levantamento dos equipamentos existentes em nossos laboratórios, sua adequação, necessidades para sua manutenção e aprimoramento dos mesmos.
 - . Os recursos financeiros para a execução de projetos novos, dos existentes e para aqueles em andamento.
- O levantamento dos recursos financeiros permite determinar quanto deveremos investir para o cumprimento das metas de desenvolvimento da Física no Brasil.

Ao fornecer esses dados, acreditamos que a SBF está adicionando elementos importantes para a formulação de uma política científica e tecnológica para o País. É também uma tentativa de buscar caminhos para a atuação da Comunidade Científica em uma sociedade democrática, e, antes de tudo, um esforço coletivo no sentido de balizarmos o futuro da Física brasileira.

É importante ressaltar que o documento não pretende cercear o surgimento de novos projetos na próxima década. A natureza dinâmica da ciência fará, inevitavelmente, com que surjam novas propostas. Estas, como todas aqui apresentadas, deverão ser analisadas no mérito e em igualdade de condições com as oferecidas neste documento. Alertamos ainda, e de forma mui especial aos órgãos de fomento, para eventuais omissões, apesar do nosso esforço e do esforço das diversas comissões, pois o presente documento pode não conter todos os projetos relevantes da comunidade dos físicos no Brasil.

Finalmente, a Diretoria da SBF agradece aos diversos colaboradores que trabalharam na elaboração do documento e, de uma maneira especial, aos coordenadores das áreas cujo trabalho e dedicação queremos ressaltar e registrar. Agradecemos, também, o apoio financeiro obtido da Finep e do CNPq sem os quais o documento não teria se tornado viável.

Gil da Costa Marques
São Paulo, 24 de agosto de 1990

FÍSICA NUCLEAR

1. FÍSICA NUCLEAR

1.1. Introdução:

Características distintivas da área da Física, hoje identificada como Física Nuclear, podem ser reconhecidas já nos resultados da análise clássica de Rutherford do espalhamento de partículas α e β por diversos materiais. Essa análise, publicada em 1911, identificou na constituição dos átomos uma escala de distâncias entre mil e dez mil vezes menor que a escala das dimensões atômicas, associada ao tamanho de um núcleo denso e eletricamente carregado. Tal imagem nucleada do átomo, por um lado, lançou bases definitivas para a compreensão da estrutura atômica e posteriormente, da estrutura molecular, bem como para a elaboração do que hoje é identificado como a vasta área da Física da Matéria Condensada. Neste contexto, estruturas e processos são presididos pela interação de constituintes leves, carregados negativamente (elétrons) e de constituintes pesados, carregados positivamente (núcleos) com o campo eletromagnético. A consolidação teórica da física desses processos constitui a Eletrodinâmica Quântica, sem dúvida a teoria física quantitativamente mais bem testada até hoje.

Por outro lado, a imagem nucleada do átomo inaugura o estudo das estruturas e processos relativos à constituição dos próprios núcleos. A dimensão reduzida e conseqüentemente, a densidade enorme desses objetos pelos padrões da matéria condensada (da ordem de 10^{13} vezes maior) está associada aos efeitos da interação nuclear forte com propriedades radicalmente diferentes das da interação eletromagnética. Dada a carga elétrica positiva dos constituintes nucleares, a interação eletromagnética tem na realidade caráter repulsivo e desempenha, portanto, um papel desagregador, que deve ser dominado, no caso dos núcleos estáveis, por efeitos atrativos da interação nuclear.

Diversos estágios percorridos na evolução da Física Nuclear desde a sua inauguração podem ser caracterizados por etapas correspondentes ao reconhecimento dos constituintes do núcleo atômico e à descrição das interações entre esses constituintes. Assim, a Física Nuclear pode ser vista, de uma forma geral, como a física da matéria superdensa envolvendo constituintes e interações exóticos, no contexto da experiência cotidiana, da qual são formados os núcleos atômicos. Na realidade, é bastante claro atualmente que o caráter exótico da matéria nuclear é estritamente relativo à natureza restrita da experiência cotidiana na escala terrestre. As propriedades da matéria nuclear desempenham um papel central e determinante, por exemplo, em processos astrofísicos como a evolução estelar e, em particular, em fenômenos cataclísmicos como explosões de supernovas, os quais estão ligados à disseminação pelo universo das várias espécies atômicas que constituem os materiais estudados pela Física da Matéria Condensada.

O estudo do balanço energético envolvendo processos físicos na escala nuclear cedo revelam também uma escala de energias completamente distinta daquela envolvida em processos atômicos, como reações químicas, por exemplo. Enquanto uma unidade de energia conveniente para a descrição destes últimos é o elétron-volt (eV, que é a energia cinética de um elétron acelerado a partir do repouso por uma diferença de potencial de um volt), as energias envolvidas em processos nucleares se exprimem convenientemente em milhões de elétron-volts (MeV). Por exemplo, a energia total liberada pela fissão de um único núcleo de urânio é cerca de 200 MeV. A potencialidade desse fato para aplicações, cuja diversidade inclui tanto explosivos como reatores nucleares, motivou a partir da década de 40 a sua exploração intensiva a nível de engenharia. É importante assinalar que desenvolvimentos importantes, neste nível, a rigor prescindem de uma compreensão dos fenômenos envolvidos em termos de Física Nuclear, embora possam utilizá-la, e efetivamente a utilizem, quando disponível. Tal situação é em boa parte análoga àquela pela qual o controle e o uso do fogo pode preceder a sua compreensão em termos de física atômica e até mesmo de química.

1.2. Constituintes Nucleares e suas Interações:

Após uma etapa inicial e que se poderia chamar pré-histórica, anterior à descoberta do nêutron (1932) e à subsequente mas imediata compreensão do seu papel na constituição nuclear, formou-se a imagem, hoje familiar até a alunos de segundo grau, do núcleo como um sistema constituído de N nêutrons e Z prótons (sendo Z o número atômico do núcleo e $A=N+Z$ o seu número de massa). Esses constituintes são ligados através de forças atrativas e de curto alcance, o que significa que a intensidade de tais forças especificamente nucleares se reduz essencialmente a zero numa distância da ordem de uma fração do raio de um núcleo médio. Essa é, na realidade, uma das diferenças qualitativas entre as forças nucleares e tanto as coulombianas como as gravitacionais, as quais variam com o inverso do quadrado da distância, sendo por isso ditas "de longo alcance". Uma outra propriedade das forças nucleares, que foi reconhecida imediatamente após a descoberta do nêutron, foi a sua independência de carga, isto é, as forças nucleares existentes entre dois prótons, dois nêutrons ou ainda entre um próton e um nêutron são essencialmente iguais. No caso de dois prótons, a essas forças deve ser acrescentada evidentemente a repulsão coulombiana, o que representa um efeito desagregador do núcleo, como já mencionado.

Esse quadro constitui, na realidade, um primeiro paradigma dentro do qual foi possível desenvolver uma teoria da estrutura nuclear e, em particular, estudar propriedades da matéria de que os núcleos são constituídos. Características quantitativas mais específicas da força nuclear foram determinadas experimentalmente estudando o processo de espalhamento próton-próton, próton-nêutron e nêutron-

nêutron, bem como as características do sistema nuclear mais simples que é o núcleo do átomo de deutério, constituído de um único próton ligado a um único nêutron. Dessa forma foi possível constatar que, embora globalmente atrativa, a força nuclear entre dois nucleons assume, na realidade, um caráter fortemente repulsivo a distâncias muito pequenas (menores que cerca de $0,5 \times 10^{13}$ cm). Esse caráter repulsivo a curtas distâncias foi, em particular, reconhecido como desempenhando um papel fundamental em relação à saturação da matéria nuclear. Esta propriedade consiste em que o volume nuclear (medido por refinamentos do procedimento inaugural de Rutherford) é proporcional ao número total A de constituintes, o que corresponde a uma densidade constante, medida como 2×10^{38} nucleons (isto é, prótons ou nêutrons) por cm^3 . (Essa densidade, em termos de massa, corresponde a $3,2 \times 10^{14}$ g/cm^3).

Um passo crucial para a compreensão da natureza da força nuclear foi dado em 1935 por Yukawa, que postulou um mecanismo análogo logo àquele através do qual a Eletrodinâmica Quântica descreve as forças coulombianas entre duas cargas elétricas. Da mesma forma, como estas resultam de trocas entre as cargas de quanta do campo eletromagnético (fótons), que são, na realidade, partículas de massa zero (do que resulta, em particular, o caráter "de longo alcance" dessas forças), Yukawa associou às forças nucleares a troca, entre os nucleons, de quanta de um novo campo os quais, para que as forças resultem como tendo as propriedades observadas de curto alcance, deveriam ter massa da ordem de 200 vezes a massa do elétron. Dessa análise resultou, portanto, a predição da existência de uma nova partícula, que foi posteriormente observada por Lattes, Occhialini e Powell (1947), conhecida hoje como píon (originalmente chamada méson π).

A descoberta de um grande número de novas partículas a partir dessa data levou a outra partilha de domínios na física com a demarcação de uma nova área identificada como Física de Partículas Elementares. Uma vasta coleção de novas partículas, genericamente chamadas hádrons, se mostrou suscetível à ação das forças de tipo nuclear, chamada interação forte. Essas novas partículas incluem algumas que podem ser classificadas ao lado de prótons e nêutrons (bárions) e outras que devem ser classificadas ao lado do píon (mésons). A elaboração de tais classificações se deu com base na análise de uma enorme variedade de processos em que as partículas são produzidas, bem como na análise de seus modos de decaimento, e conduziu a um esquema cuja complexidade fez pensar numa "nova espectroscopia", associada a uma dinâmica à escala subnuclear. Ao fim deste processo, que se desenvolveu ao longo de cerca de duas décadas, bárions e mésons passaram a ser vistos não mais como partículas elementares, mas como objetos complexos constituídos de entidades mais fundamentais, os quarks. A articulação da nova espectroscopia subnuclear envolveu, em particular, uma classificação envolvendo vários tipos de quarks, distinguidos por propriedades que passaram a receber a designação, com conotações fortemente metafóricas, de cores e sabores. (Bárions e mésons são "brancos", devendo portanto conter necessariamente

quarks de cores "complementares"; diferentes sabores, por outro lado, dão origem, por exemplo, a grupos diferentes de bárions: prótons e nêutrons, lâmbdas, sigmas etc.).

O resultado desses desenvolvimentos foi uma nova síntese teórica em que quarks coloridos interagem através dos quanta, chamados gluons, de um campo análogo ao campo eletromagnético, mas também colorido. Os gluons são, portanto, os "fótons" do campo com cores. Tal teoria, chamada Cromodinâmica Quântica, fornece a moldura de um novo paradigma para o estudo da chamada matéria hadrônica, vista agora como organizada em última análise a partir de uma dinâmica de quarks e gluons, e da qual a matéria nuclear seria a ou uma das formas estáveis.

O desenvolvimento da física das partículas elementares pôs em evidência, ao lado dos bárions, uma outra linhagem de partículas chamadas léptons, que são por assim dizer imunes às interações fortes. Os elétrons, responsáveis pela estrutura da chamada Matéria Condensada, são os seus patriarcas, acompanhados logo pelos muons e taus (com massas na faixa das massas "mesônicas") e respectivos neutrinos. Essas partículas interagem com os hadrons através de processos eletromagnéticos e/ou através das chamadas interações fracas, responsáveis em particular pelo decaimento beta, identificado há quase um século como uma das formas da "radioatividade natural". Um esquema unificado para as interações eletromagnéticas e fracas (desde então referidas muitas vezes como interações eletro-fracas) constituiu, de fato, uma das importantes sínteses teóricas das últimas décadas. Embora a ausência das interações fortes afaste os léptons da arena dinâmica principal da matéria hadrônica, esses objetos são, e por essa mesma razão, pontas de prova extremamente delicadas e úteis para a exploração minuciosa da estrutura nuclear.

1.3. Aceleradores:

O tipo de experiência da qual Rutherford pode deduzir a geometria do átomo, a saber, a observação do que ocorre quando um feixe de partículas colide com um alvo interposto em seu trajeto, é o "microscópio" através do qual é obtida praticamente toda informação a cerca da estrutura sub-atômica da matéria. Por isso, os instrumentos básicos para a pesquisa experimental em Física Nuclear (e também na Física das Partículas Elementares) são as máquinas que produzem os feixes para essas experiências. Tais máquinas são genericamente chamadas aceleradores. Nas primeiras experiências (à época de Rutherford) os feixes eram obtidos colimando os produtos de desintegração de fontes radioativas naturais, mas o grande desenvolvimento da Física Nuclear se deu de forma correlacionada com o desenvolvimento da tecnologia de aceleradores de vários tipos. Concomitantemente, papel não menos fundamental coube ao desenvolvimento da tecnologia de detectores, que são os instrumentos encarregados da medida do que resulta da colisão do feixe com o alvo, bem como de equipamentos para registro, armazenamento e processamento de dados.

Características básicas dos feixes são o tipo de partícula de que são constituídos e a energia cinética imprimida às partículas. Todos os tipos de acelerador operam aumentando a energia cinética de partículas eletricamente carregadas sujeitando-se à ação de campos elétricos ou eletromagnéticos. Dessa forma os feixes diretamente produzidos em aceleradores (feixes primários) consistem de partículas carregadas estáveis: elétrons, prótons ou átomos ionizados de elementos mais pesados. A partir de tais feixes é possível ainda obter feixes chamados secundários, através de sua colisão com alvos apropriados, os quais poderão consistir de partículas neutras e/ou instáveis, desde que com um tempo de sobrevida suficiente mente longo para permitir sua utilização em novo processo de colisão. Dessa forma podem ser obtidos feixes de fótons, nêutrons, píons e outros tipos de mésons, íons de isótopos instáveis etc.. A importância da energia dos feixes primários provém de que ela aparece como fator limitante inexorável dos processos que poderão resultar da colisão (em particular dos feixes secundários obtíveis) e também das escalas de distância discerníveis através do "microscópio" sub-atômico.

Outras características importantes dos feixes, e que diferem para diferentes tipos de acelerador, são a intensidade (número médio de partículas aceleradas por segundo) e a distribuição temporal das partículas produzidas (o que às vezes é chamado "microestrutura do feixe"). Existem aceleradores que produzem feixes ditos "contínuos", nos quais as partículas aceleradas emergem a uma taxa uniforme, enquanto outros produzem feixes "pulsados", nos quais as partículas aceleradas emergem em pulsos de curta duração e muito intensos, alternados com períodos de inatividade (tipicamente os pulsos são repetidos muitas vezes por segundo). Para classificar os aceleradores quanto a esta característica é comum o uso de um "número de mérito" definido como a porcentagem do tempo de operação do do acelerador em que há efetivamente partículas emergentes como feixe. Por exemplo, um acelerador de feixe contínuo tem um número de mérito de 100%; um acelerador com número de mérito de 1% produz pulsos cuja intensidade é 100 vezes a intensidade média do feixe, alternados com períodos de quiescência 99 vezes mais longos que a duração de um pulso (v. figura).

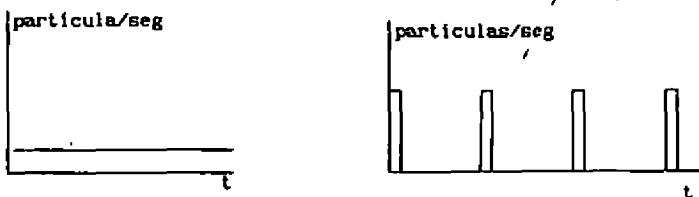


Figura: Distribuição temporal de dois feixes de mesma intensidade média mas com números de mérito diferentes. O gráfico da esquerda representa um feixe contínuo, o da direita um feixe com figura de mérito 10%.

Um dos desenvolvimentos recentes e cruciais para o estudo da estrutura nuclear e subnuclear foi a possibilidade de construir aceleradores de elétrons com número de mérito alto (próximo de 100%). De fato, a imunidade dos elétrons à interação forte, bem como a disponibilidade da descrição teórica de altíssima confiabilidade quantitativa que é a Eletrodinâmica Quântica para as interações eletromagnéticas (é possível incluir aqui ainda a unificação das interações eletromagnéticas e fracas), faz dessas partículas pontas de prova *sui generis* para o estudo da estrutura de sistemas hadrônicos. Esse fato foi explorado desde a década de 50, mas com os aceleradores disponíveis, que eram limitados a números de mérito extremamente baixos (muito menores que 1%). Isso leva inevitavelmente a situações em que os eventos a estudar são múltiplamente produzidos, em intervalos de tempo muito curtos, por pulsos muito intensos. A disponibilidade de feixes temporalmente mais uniformes permite uma melhor distribuição temporal dos eventos a estudar, possibilitando assim a sua observação individual, identificando e detectando vários produtos provenientes de um único processo de colisão. Esse tipo de medida na realidade reabre o campo da exploração da estrutura nuclear e subnuclear através de interações eletromagnéticas e motiva novos grandes projetos de aceleradores de elétrons como o CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) nos EUA, atualmente em construção. No caso de feixes hadrônicos, por outro lado, freqüentemente a conveniência está em dispor de feixes pulsados, com pulsos muito curtos. De fato, neste caso a probabilidade de ocorrência dos fenômenos a estudar é em geral maior que no caso de projéteis eletromagnéticos, sendo possível reduzir a intensidade média do feixe. A localização temporal dos eventos devida ao caráter pulsado do feixe, por outro lado, permite o recurso a técnicas tipo tempo de voo para medir as características de produtos resultantes da colisão.

Outro desenvolvimento da maior importância para o estudo de propriedades da matéria hadrônica, ocorrido ao longo das duas últimas décadas, foi a construção de aceleradores para produzir feixes de íons mais pesados que os núcleos de hidrogênio e hélio (e seus isótopos), que predominavam nos feixes disponíveis anteriormente. Neste

contexto, são parâmetros cruciais o tipo e a energia das partículas do feixe. Esta é geralmente expressa em MeV/A, isto é, milhões de elétron-volts por nucleon.

Um primeiro valor de referência para a energia dos fons acelerados é a energia necessária para vencer a repulsão coulombiana entre projétil e alvo. Ela varia de cerca de 0,5 MeV/A para dois fons muito leves até cerca de 5 MeV/A para dois fons muito pesados. Essa chamada barreira coulombiana limita drasticamente a participação da interação forte em energias mais baixas, devido ao curto alcance desta interação. É importante notar, porém, que processos nucleares cruciais para a evolução estelar resultam de colisões envolvendo energias associadas à temperatura estelar, o que as coloca consideravelmente abaixo da barreira coulombiana. Por isso, o estudo em laboratório desses processos é extremamente dificultado por uma baixíssima probabilidade de ocorrência, o que levou à construção de aceleradores especializados, produzindo feixes de energia baixa mas intensidade muito alta.

Aceleradores capazes de produzir feixes de fons pesados na faixa que se estende desde a barreira coulombiana até várias dezenas de MeV/A são usualmente chamados aceleradores de baixa energia. Essa marca está relacionada com o fato de que um número típico para a energia cinética máxima de um nucleon em um núcleo atômico (esta energia cinética está relacionada com a interação forte dos nucleons em questão, com os outros nucleons do núcleo) é 50 MeV. Nessas condições, numa colisão em baixa energia a velocidade relativa dos fons não excede a velocidade dos nucleons dentro dos respectivos núcleos. Uma terceira energia de referência é a de 140 MeV/A, chamada o "limiar de píons", pois $m_{\pi} c^2 = 140$ MeV, sendo m_{π} a massa do pión. A referência de energia da qual depende o caráter relativístico ou não relativístico dos fons envolvidos, por outro lado, é 1000 MeV/A, que corresponde, através do fator c^2 , à massa de repouso de um nucleon. Existe atualmente um esforço considerável envolvido em aceleradores de fons pesados na faixa de energia ultra-relativística, isto é, energias muito maiores que 1000 MeV/A. O que se procura nessas energias é produzir e estudar fases mais exóticas da matéria hadrônica que a matéria nuclear, cuja dinâmica é estudada em energias baixas e intermediárias. Essas fases, que incluem em particular o plasma de quarks e gluons, testarão predições baseadas na Cromodinâmica Quântica e constituirão como que uma versão de laboratório de condições que se pensa tenham ocorrido nos primeiros instantes do Universo após o "Big Bang".

O projeto, a construção e a manutenção e operação de aceleradores de alta energia e do equipamento de detecção e controle a eles associado representam investimentos consideráveis não só em termos de recursos econômicos mas também de mão-de-obra altamente especializada, à escala dos países mais ricos do mundo. Como consequência disso, os laboratórios que os contêm tendem a envolver o esforço coordenado de um número grande de grupos de pesquisa independentes, freqüentemente envolvendo vários países. Tais empreendimentos não só utilizam mas também desenvolvem tecnologia sofisticada capaz de realimentar outros setores de

atividade. Um papel análogo a esse é desempenhado, em países como o Brasil, por laboratórios contendo aceleradores de energia baixa ou intermediária, além da associação a empreendimentos trans-nacionais.

2. FRONTEIRAS INTERNAS E EXTERNAS DA FÍSICA NUCLEAR

A mudança de perspectiva provocada pelo impacto sobre a Física Nuclear das novas idéias sobre a estrutura hadrônica afetou profundamente as linhas de pesquisa da área, sem no entanto extinguir ou invalidar aquelas baseadas no paradigma tradicional, envolvendo nucleons essencialmente "elementares" interagindo através de forças estabelecidas fenomenologicamente. Isso não se deve a algum conservadorismo irredutível. Na realidade, através do aperfeiçoamento de técnicas para lidar com o problema nuclear de muitos corpos tem sido possível dar conta de um elenco muito significativo de propriedades nucleares específicas. Portanto, esses sucessos deverão ser pelo menos mantidos no contexto de uma descrição mais profunda ou elementar, e nesse sentido lhe servem de balizamento. Em particular, os sucessos do ponto de vista "tradicional" já delimitam de forma surpreendente o domínio de fenômenos para a descrição dos quais o novo paradigma possa ser essencial. Assim é que, num trabalho recente sobre a estrutura nuclear foi dito que "procurar quarks no núcleo é como procurar a máfia na Sicília: todos sabem que ela está lá, mas é muito difícil encontrar evidências disso". Em termos menos metafóricos, não existem hoje ainda propriedades de estrutura nuclear que exijam inequivocamente a intervenção de graus de liberdade subnucleares.

Para organizar as atuais linhas de pesquisa na área, é conveniente parafrasear uma classificação, sugerida há tempos por Weisskopf, das fronteiras de pesquisa em física, dizendo que a Física Nuclear tem hoje uma "fronteira externa", em boa parte comum com a área da Física das Partículas Elementares, em que os sistemas nucleares funcionam como "laboratórios" para o estudo da matéria hadrônica; e que tem ainda "fronteiras internas", em que o problema central consiste em compreender, dentro de um esquema teórico consistente, embora não necessariamente fundamental, propriedades de sistemas com muitos graus de liberdade dominados por interações fortes. Um fato extremamente significativo é que os progressos nessas duas fronteiras não podem ser pensados como independentes. Por exemplo, as incertezas quantitativas inerentes às aproximações, presentemente inevitáveis, no tratamento da dinâmica de sistemas com muitos graus de liberdade e interações fortes limitam consideravelmente a interpretação de fenômenos associados a processos subnucleares que tenham lugar no "laboratório nuclear".

2.1. Fronteiras Internas: O Problema Nuclear de Muitos Corpos

Trabalhos relativos ao problema nuclear de muitos corpos são tradicionalmente classificados em duas grandes subdivisões. A primeira, conhecida como Estrutura Nuclear, compreende a descrição das propriedades dos espectros nucleares, incluindo o tratamento perturbativo de taxas de transição envolvendo processos eletromagnéticos/fracos; a segunda, Reações Nucleares, trata basicamente de processos dinâmicos envolvendo a interação forte de maneira essencial. Uma característica marcante de progressos conseguidos na última década, no entanto, é a de que eles se tem muitas vezes dado num sentido que tira dessa subdivisão muito de sua relevância. Um exemplo claro disso pode ser encontrado na descrição de modos de excitação nucleares de natureza coletiva, isto é, envolvendo a participação coerente, ou correlacionada, de um número grande dos graus de liberdade, tomados como elementares dentro do nível adotado de descrição. Nessa categoria estão, em especial, as chamadas Ressonâncias Nucleares Gigantes. Estas foram inicialmente tratadas como um problema de Estrutura Nuclear, do que resultou uma compreensão das energias de excitação envolvidas e das taxas de transições eletromagnéticas em termos de propriedades específicas da função de onda nuclear de muitos corpos. No entanto, os valores das energias de excitação envolvidas, ao lado do refinamento de técnicas experimentais, que atualmente fornecem informações pormenorizadas sobre os decaimentos fortes desses modos, exigiram a imersão da descrição disponível ao nível de Estrutura Nuclear (isto é, as funções de onda) no quadro de uma teoria de Reações Nucleares, para a elaboração de uma descrição mais completa e consistente. Dessa forma, é preciso ter presente que a dicotomia tradicional em termos de Estrutura Nuclear e Reações Nucleares deve ser, no mínimo, enfraquecida pela importância crescente de uma zona em que esses dois domínios extremos se interpenetram essencialmente.

2.1.1. Modelos microscópicos

O ponto de partida usual nos chamados modelos microscópicos para a dinâmica de sistemas nucleares consiste, como já foi dito, em tomar nucleons (prótons e nêutrons) "elementares", interagindo através de forças ajustadas de modo a bem descrever as propriedades de sistemas de dois nucleons. O programa de obter quantitativamente, a partir desses ingredientes, propriedades de núcleos reais, teve progresso considerável durante a década de 70 e no início da década de 80, quando foram desenvolvidas e implementadas técnicas capazes de relacioná-los com características coletivas básicas dos estados fundamentais dos núcleos, como raio e energia de ligação, por exemplo. O ingrediente básico nessas técnicas é um campo médio efetivo, auto-consistente, gerado pelos nucleons e organizador do movimento dos próprios nucleons. Testes adicionais

desses resultados, e prolongamentos naturais desse programa consistem em estudar a existência e as propriedades de sistemas nucleares "exóticos", isto é, contendo proporções anômalas de prótons ou nêutrons (núcleos com um grande excesso de nêutrons ou prótons), ou núcleos superpesados, e em estudar também a natureza dos modos de excitação nucleares. Desenvolvimento em técnicas experimentais vem permitindo ultimamente uma enorme expansão da informação disponível sobre tais sistemas.

No que se refere aos modos de excitação, uma linha especialmente rica é aquela que investiga a rotação coletiva dos núcleos. Esse tipo de excitação se manifesta nos espectros nucleares através de estruturas características chamadas bandas rotacionais, que foram observadas até valores do momento angular numa região em que se situa o limite de estabilidade em relação ao efeito desagregador das tendências centrífugas. Por outro lado, dispõe-se atualmente de dados sobre uma extensa taxonomia de excitações coletivas vibracionais, envolvendo oscilações nas densidades de massa, carga e spin. Estando em princípio dentro do alcance explicativo dos modelos microscópicos, muitos dos dados disponíveis esperam ainda, no entanto, por uma análise teórica pormenorizada nesses termos.

Ainda no que se refere a modelos microscópicos, um desenvolvimento importante foi iniciado em 1974 com uma tentativa de J.D. Walecka de extrapolar para densidades muito altas (isto é, muito mais altas que a densidade nuclear normal) as propriedades da matéria nuclear. A motivação original era obter uma equação de estado utilizável em situações de interesse astrofísico. Para atingir esse objetivo, foi proposto um modelo microscópico relativístico, formulado como uma teoria quântica de campos na qual um campo fermiônico "elementar" - associado aos nucleons - interage com um campo bosônico escalar e com um campo bosônico vetorial, ambos massivos e neutros, através de interações tipo Yukawa. Essa teoria, tratada numa aproximação de campo médio, se revelou extremamente poderosa, permitindo reproduzir de forma muito elegante e econômica resultados que haviam sido obtidos com considerável esforço a partir do esquema microscópico tradicional. Isso deu origem a um novo programa, que consistiria em delimitar o alcance de uma descrição microscópica que não envolva referência aos graus de liberdade subnucleares, estudando os limites preditivos do modelo relativístico, através do refinamento da aproximação de campo médio inicialmente adotada. Tal programa, no entanto, se defronta atualmente com o obstáculo considerável de que se revelaram inadequados os esquemas de aproximação disponíveis para teorias de campo relativísticas no sentido de incluir efeitos além da aproximação de campo médio.

Provavelmente o campo em que se darão os testes mais precisos e detalhados dos modelos nucleares microscópicos será o estudo de excitações eletromagnéticas dos núcleos por espalhamento inelástico de elétrons. Nestas experiências é possível sintonizar não só a energia transferida para o núcleo como também, e independentemente, o momento transferido, o que permite estudar o alvo em diferentes

escalas de distância e energias de excitação. Mesmo em experiências inclusivas, nas quais não se observa os produtos de desintegração do alvo excitado, é possível identificar propriedades da resposta à ação do projétil eletromagnético que tem uma relação direta com correlações entre nucleons e mesmo com certos aspectos da estrutura subnuclear. Existe atualmente, em particular, alguma disputa quanto ao fato de os dados existentes exigirem ou não uma alteração das propriedades (subnucleares) dos nucleons quando estes se encontram imersos no meio nuclear. Esta disputa se deve, na realidade, a incertezas nos resultados quantitativos de modelos microscópicos da estrutura nuclear, que, no momento, impedem que discrepâncias residuais com dados experimentais sejam inequivocamente atribuídas à participação de graus de liberdade subnucleares.

2.1.2. Fenômenos e descrições macroscópicas

Vários modos de excitação nucleares mencionados no item anterior se prestam naturalmente também a descrições em termos de modelos macroscópicos, isto é, que omitem referência explícita a quaisquer constituintes elementares em favor da introdução de variáveis adequadas, de natureza global, ou coletiva. Dessa forma, na realidade, foram descritas inicialmente a rotação e diferentes tipos de vibrações de núcleos. A descrição coletiva mais simples desses tipos de excitação se faz através de variáveis dinâmicas associadas à orientação no espaço do núcleo e à sua forma, por exemplo. O desenvolvimento deste tipo de descrição está indissoluvelmente ligado ao trabalho de A. Bohr e B. Mottelson, e uma conexão com os modelos microscópicos pode ser estabelecida reinterpretando a forma e orientação espacial do núcleo em termos da forma e orientação do campo médio nuclear, no sentido dos modelos microscópicos. Nesse sentido, pode-se dizer que os fenômenos nucleares suscetíveis à descrições macroscópicas são aqueles dominados pelos efeitos do campo médio nuclear, que aparece então como a matriz das mais variadas linhagens de coordenadas coletivas.

Isso é o que ocorre, em particular, com colisões envolvendo íons pesados (tal designação se aplicando, na realidade, a projéteis e alvos mais pesados que a partícula α), em baixas energias (o que significa tipicamente velocidades relativas menores que as velocidades típicas de nucleons de cada íon dentro de seu respectivo campo médio). O estudo extensivo destes processos ao longo das duas últimas décadas é um dos capítulos fenomenologicamente mais ricos da física nuclear. E progressos experimentais no sentido de um esforço deliberado buscando levar a cabo medidas menos inclusivas e mais precisas permitem, em muitos casos, circunscrever os aspectos tipicamente coletivos, pondo em evidência efeitos que exigem a introdução de pelo menos algumas variáveis de natureza microscópica para sua descrição quantitativa.

No domínio de baixas energias, processos de colisão a energias relativas muito menores que as necessárias para vencer a repulsão coulombiana entre os íons tem um

interesse especial, em vista de seu interesse astrofísico. Tais colisões, de fato, são responsáveis pela síntese de elementos mais leves que o ferro através de processos de fusão no interior de estrelas. Portanto, dados quantitativos acerca das respectivas seções de choque são ingredientes importantes para qualquer teoria quantitativa da evolução estelar. Experimentalmente, no entanto, é um problema extremamente difícil obtê-los devido à ação inibidora da repulsão coulombiana, que faz com que tais seções de choque sejam extremamente - em muitos casos de interesse, proibitivamente, até - baixas. Daí a importância de facilidades experimentais capazes de produzir feixes muito intensos de íons pesados de baixas energias, bem como a importância de esforços complementares no sentido da determinação indireta dessas seções de choque.

Um campo relativamente novo, em rápido desenvolvimento, e que ilustra a importância e as limitações de descrições de natureza macroscópica é o estudo de núcleos muito afastados da região dos núcleos estáveis. Sendo instáveis, tais núcleos não podem ser utilizados como alvos em experiências de tipo convencional, mas podem ser preparados e utilizados como projéteis em feixes secundários. Resultados obtidos recentemente dessa forma por I. Tanihata indicam que núcleos exóticos como o ^{11}Li (que contém três prótons e oito nêutrons) são bem maiores que núcleos não exóticos de mesma massa (^{11}B , no caso, com cinco prótons e seis nêutrons). Por exemplo, a distribuição espacial do ^{11}Li parece ter um raio da ordem de $3,5 \times 10^{-13}$ cm, enquanto o valor correspondente para o ^{11}B é apenas $2,3 \times 10^{-13}$ cm. Ao mesmo tempo, no caso do ^{11}Li , cálculos teóricos indicam que a distribuição de cargas tem um raio semelhante ao do ^{11}B , de forma que existe uma auréola consideravelmente extensa de nêutrons além dessa distribuição mais concentrada de prótons. Tais características macroscópicas, no entanto, abrem uma série de possibilidades interessantes do ponto de vista microscópico, uma das quais é a possibilidade de que os nêutrons extranumerários existam de forma correlacionada nesses núcleos, formando sistemas quase-ligados que se poderiam chamar "polinêutrons". Um possível modelo semi-microscópico para o ^{11}Li , por exemplo, seria um dinêutron fracamente ligado ao ^{11}Li , a pequena energia de ligação sendo responsável pela grande extensão espacial da distribuição de nêutrons. A grande assimetria existente entre a distribuição espacial de carga e de massa, por outro lado, daria origem a modos vibracionais de excitação (do mesmo tipo que as ressonâncias gigantes de núcleos não exóticos) de frequência e, portanto, de energia de excitação muito baixa (da ordem de 1 MeV), cujo estudo estenderia de forma muito relevante o dos modos de decaimento das vibrações de núcleos convencionais.

Com o aumento da energia relativa em colisões entre íons pesados a participação ativa de graus de liberdade microscópicos (isto é, a importância do comportamento de nucleons individuais e eventualmente de outras partículas que possam ser produzidas, como fótons e mésons) se torna cada vez mais conspícua, sem que, no entanto, a presença organizadora do campo médio nuclear deixe de ser extremamente importante tanto qualitativa como quantitativamente. De fato, em energias da ordem de 500

MeV/nucleon os efeitos do campo médio parecem desempenhar ainda um papel crucial, por exemplo, no direcionamento dos fragmentos resultantes da colisão. Este aspecto, de fato, não é corretamente descrito por modelos microscópicos simplificados que consideram apenas colisões entre pares de nucleons individuais, ignorando os efeitos, de natureza coletiva, do campo médio. Por outro lado, nestas energias é impossível ignorar o papel das colisões entre nucleons individuais, embora submetidos à ação global do campo médio.

2.1.3. Simetrias e modelos nucleares

A complexidade do problema nuclear de muitos corpos, com a consequência inescapável de não ser exatamente solúvel, enfatiza consideravelmente a importância das simetrias, exatas ou aproximadas, que nela possam ser identificadas. Na realidade, como observado por Wigner, as simetrias podem resultar até inúteis quando ou na medida em que se possa tratar um problema exatamente, mas são um guia extremamente poderoso em outras circunstâncias. Um exemplo notável da utilidade de uma simetria aproximada é dado pelo papel desempenhado pelo isospin na física da Estrutura Nuclear. Essa quantidade está ligada à independência de carga das forças nucleares, que torna por assim dizer o problema simétrico em relação à substituição de prótons por nêutrons e vice-versa. Tal simetria, porém, é apenas aproximada, dado que as interações eletromagnéticas (em particular, as interações coulombianas) a violam, ao serem capazes de distinguir prótons de nêutrons. Apesar disso, ela se manifesta de forma inequívoca nos espectros nucleares, sendo indispensável em qualquer esquema classificatório para tais espectros.

Outras simetrias, eventualmente mais sutis ou sofisticadas, são utilizadas para definir truncamentos adequados do problema nuclear microscópico de muitos corpos, formulado a partir da aproximação de campo médio nuclear. Esta formulação, conhecida genericamente como modelo de camadas, é formalmente exata, mas exigiria a resolução de problemas seculares (isto é, diagonalização de matrizes) de dimensões impraticáveis (a rigor, de dimensão infinita!). Uma das linhas, amplamente praticada, de reduzir as dimensões de tal problema, conhecida como modelo de bósons interagentes (Interacting Boson Model, IBM) consiste em envolver apenas alguns nucleons (os das "camadas de valência") nas excitações de baixa energia, admitindo ainda que apenas pares de nucleons acoplados a momento angular total $J=0$ e $J=2$ desempenham papel relevante. Os operadores relevantes, definidos dessa forma, têm propriedades algébricas associáveis a um grupo de transformações, cujas possíveis representações são utilizadas para classificação de espectros nucleares. Dentro desta linha, a própria dinâmica é fenomenologicamente formulada de modo a envolver apenas combinações apropriadas de elementos do grupo. Existem atualmente em uso diversas versões e extensões deste modelo (estas últimas incluindo, por exemplo, também excitações elementares de

caráter fermiônico, de forma a estender à classificação de espectros nucleares os esquemas "supersimétricos"), bem como uma variedade de formulações no sentido de conectá-las com os modelos microscópicos "elementares". Seu poder e utilidade se faz sentir sobretudo na espectroscopia nuclear de baixas energias.

2.2. Fronteiras Externas: Estrutura Subnuclear e Matéria Hadrônica

Existem pelo menos duas direções em que o campo da Física Nuclear se estende para além de seus domínios convencionais. A primeira delas consiste na busca das limitações inerentes a uma descrição a partir de nucleons tratados como elementares, interagindo através de forças determinadas fenomenologicamente, aplicada às espécies nucleares, normais ou exóticas, em seus estados fundamentais ou relativamente pouco excitados. Ela pode ser descrita, portanto, como a busca das limitações inerentes ao uso exclusivo dos graus de liberdade convencionais da física nuclear, ou como a busca do limiar além do qual é indispensável um defrontamento com a estrutura da matéria ao nível subnuclear, ainda dentro do domínio de baixas energias de excitação. A segunda das duas direções por outro lado, consiste na busca de estados ou fases da matéria hadrônica que, envolvendo graus de liberdade subnucleares de uma forma essencial, se colocam além do repertório fenomenológico usual relativo à matéria nuclear. Tais estados ou fases envolvem tipicamente densidades muito diferentes da densidade de equilíbrio e/ou energias de excitação extremamente grandes.

Por seguirem percursos distintos em direção ao termo comum que é caracterizar efeitos de graus de liberdade subnucleares, essas duas extensões da Física Nuclear convencional necessitam de instrumentos de natureza também distinta para a sua exploração. De fato, no caso dos estados próximos ao equilíbrio, a exploração deverá ser conduzida através de sondas muito finas, capazes de resolver distâncias muito pequenas e tempos muito curtos (na escala da Física Nuclear convencional), implicando ao mesmo tempo em perturbações pequenas e controláveis do sistema em estudo. Tais requisitos são satisfeitos em processos envolvendo o espalhamento elástico e inelástico de léptons, desde que tais processos possam ser estudados num intervalo suficientemente extenso de momento transferido e de energia transferida (no caso de espalhamento inelástico). O interesse em poder dispor de dados tanto quanto possível não inclusivos, por outro lado, aponta como instrumentos ideais nesta linha de investigação aceleradores de elétrons com feixe contínuo e energia suficientemente alta, e a atual construção do CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) na Virgínia, EUA, se prende a essa motivação.

A produção, em laboratório, de estados ou fases não convencionais da matéria hadrônica exige, por outro lado, a possibilidade de atingir densidades de energia muito maiores que as encontradas na matéria nuclear equilibrada, o que se pode conseguir através de colisões entre fragmentos massivos (íons pesados) acelerados a energias

ultra-relativísticas. Uma fonte até certo ponto gratuita de tais projéteis (na realidade, sua efetiva utilização pode resultar razoavelmente dispendiosa por padrões brasileiros) se encontra na radiação cósmica, e como tal vem sendo utilizada há muitas décadas e com resultados importantes, como os eventos "Centaurus" observados pela colaboração Brasil-Japão. Para evitar muitas incertezas e o inevitável elemento fortuito presente em tais experiências, contudo, existe um esforço internacional deliberado no sentido da construção de aceleradores para feixes ultra-relativísticos de íons pesados. Os feixes mais energéticos atualmente disponíveis estão no CERN (Genebra, Suíça) e em Brookhaven (EUA), e atingem 200 GeV/A e 15 GeV/A respectivamente.

3. LIGAÇÕES DA FÍSICA NUCLEAR COM OUTRAS ÁREAS

Em geral, as ligações da Física Nuclear com outras áreas da física se estabelecem seja diretamente, através da aplicação de seus resultados, seja indiretamente, através da utilização de técnicas desenvolvidas para obtê-las. Exemplos típicos desses dois tipos de ligação são, por um lado, a utilização de informação sobre a equação de estado da matéria nuclear para o estudo de problemas de evolução estelar e, por outro lado, a utilização de aceleradores de partículas em problemas de Física de Materiais (fontes de luz síncrotron, estudo de superfícies, implantação de íons etc.). Há ainda a considerar aplicações da Física Nuclear fora da própria Física, em problemas de Medicina, Agricultura, Meio Ambiente, Energia etc.. O propósito deste capítulo é dar uma breve descrição dos elementos mais notáveis dessa trama.

Além dessa caracterização geral das ligações externas da Física Nuclear, alguns aspectos específicos são especialmente notáveis no Brasil, dado que a Física Nuclear foi a primeira área da Física desenvolvida sistematicamente aqui em termos experimentais. Dessa forma, a Física Nuclear foi e continua sendo, no país, uma fonte muito importante de recursos tanto tecnológicos quanto humanos para outras áreas, especialmente a Física Atômica, a Física dos Materiais e a Física de Plasmas.

3.1. Núcleos Como Ferramentas e Como Laboratórios

Como descrito no primeiro capítulo, o domínio da Física Nuclear envolve a descrição de uma forma de organização da matéria em escala de tamanho muito menor e em escala de energia muito maior que as escalas que caracterizam as formas de organização da matéria ao nível da experiência cotidiana. O domínio natural em que as escalas nucleares adquirem uma relevância básica é, de fato, o dos fenômenos astrofísicos. O conhecimento e o controle de processos ao nível nuclear, no entanto, fornece ferramentas extremamente poderosas para o estudo de materiais, fenômenos e processos à escala terrestre e humana. Dessa forma, de fato, é possível, por um lado, utilizar átomos nuclearmente "marcados" por conterem núcleos instáveis para a análise

de materiais e para o estudo de processos dinâmicos de interesse físico, técnico ou biológico. Este tipo de aplicação envolve não somente a questão do inventário e produção das espécies atômicas marcadas, mas também toda a tecnologia de detecção e análise dos processos nucleares de decaimento. Atualmente técnicas desse tipo são amplamente utilizadas, por exemplo, para análises quantitativas de elementos em amostras em condições inacessíveis para análises químicas, para o estudo de desgastes mecânicos, da permeabilidade de solos e, na área médica e biológica, para o estudo funcional e metabólico de organismos vivos.

Além dessas aplicações, os núcleos atômicos podem ser também utilizados como "laboratórios" em que podem ocorrer processos mais "fundamentais", em escala de tamanho muito menor e em escala de energia muito maior que as escalas nucleares, comumente associadas à área da física das partículas elementares. Aqui, um controle suficiente dos fenômenos nucleares corresponde essencialmente ao controle das "condições experimentais" no laboratório em que tais processos ocorrem. Os graus de liberdade neles envolvidos são, conforme o entendimento presentemente disponível, os da cromodinâmica quântica. Desenvolvimento nesse sentido, embora hoje nos seus estágios iniciais, parece oferecer uma das perspectivas mais promissoras para a expansão interrelacionada da Física das Partículas Elementares com a Física Nuclear.

3.2. Usos não Nucleares de Aceleradores

Certamente o impacto mais notável de desenvolvimentos iniciados no âmbito da Física Nuclear sobre outras áreas da Física e também de outras Ciências se prende à utilização de aceleradores de partículas em um amplo espectro de problemas de pesquisa tanto básica com aplicada, bem como a sua incorporação ao rol de dispositivos básicos para várias tecnologias. A natureza e as potencialidades de tal impacto, no que se refere a aceleradores de partículas pesadas, sobre os domínios da Física Atômica, da Física Molecular, da Física da Matéria Condensada e da Física dos Materiais foi revista na VI Reunião de Trabalho de Física Nuclear da SBF (A.G. Pinho, Anais da Reunião (1983), p. 131). Por outro lado, a utilização de radiação de síncrotron obtida de feixes de elétrons com energia na faixa de GeVs se tornou fundamental tanto para a pesquisa em Física de Materiais como em aplicações de natureza tecnológica.

É interessante notar ainda um retorno, para a Física Nuclear, ligado à expansão dos laboratórios prioritariamente dedicados à utilização de radiação de síncrotron em Física de Materiais e tecnologia. Ela consiste na produção de fótons monocromáticos e polarizados, na faixa de centenas de MeV, através do retroespalhamento de feixes de laser pelos elétrons de alta energia. Tais dispositivos são atualmente disponíveis em Frascati (energias de fóton de até 80 MeV com intensidades da ordem de 10^5 fótons por segundo) e em Brookhaven (fótons de até 300 MeV com intensidades da ordem de 10^7 fótons por segundo), estando ainda prevista para 1995 a disponibilidade, em Grenoble,

de fótons retroespalhados por elétrons de 6 GeV com uma energia de até 1500 MeV e com intensidades também da ordem de 10^7 fótons por segundo.

3.3. Particularidades do Caso Brasileiro

Como já mencionado, a primeira área da Física a ter um desenvolvimento experimental sistemático no país foi a Física Nuclear. Dessa forma, como seria natural esperar, a Física Nuclear vem contribuindo de forma muito importante, seja em termos de experiência tecnológica, seja em termos de recursos humanos, para outras áreas da Física e para aplicações de várias ordens, especialmente no que se refere à Física Atômica e Molecular, Física da Matéria Condensada e Física de Plasmas e Energia. De fato, um contingente muito importante do corpo de pesquisadores nessas áreas no Rio Grande do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro é oriundo da área da Física Nuclear. Até o presente, o Grupo de Poluição do Ar na Universidade de São Paulo utiliza o acelerador prioritariamente dedicado à Física Nuclear para trabalhos baseados na análise de raios X induzidos por prótons. Além disso a capacitação técnica existente no país em questões como sistemas de alto vácuo e a física de aceleradores está vinculada de maneira essencial aos laboratórios dedicados à Física Nuclear.

4. FÍSICA NUCLEAR NO BRASIL: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

. O Valor da Física Nuclear no Treinamento de Estudantes de Pós-Graduação

A pesquisa em física nuclear oferece um excelente treinamento não somente para as carreiras acadêmicas mas também para as indústrias de inovação. Esta afirmação se baseia no exemplo internacional onde é intensa a demanda de estudantes treinados na área nuclear. As razões são óbvias: as experiências em física nuclear são suficientemente sofisticadas e demandam tecnologias avançadas. Por outro lado, podem ser conduzidas por grupos pequenos de maneira que um estudante pode contribuir em todos os seus aspectos durante a duração do seu doutoramento.

O estudante inicia seu projeto desenhando e construindo alguns dos equipamentos necessários para o seu trabalho de pesquisa. Nessa ocasião é exposto a vários problemas de engenharia mecânica e eletrônica, aplicações de informática, tecnologia de alto vácuo e sistemas de detecção dos produtos de reação. Para alguns dos estudantes esta fase de trabalho pode torná-los verdadeiros peritos em tópicos de tecnologias de fronteira como eletrônica rápida e de baixo ruído, sistemas de controle utilizando microprocessadores, interfaces de computadores em tempo real, novos "devices" com semicondutores.

A utilização de aceleradores na maioria das pesquisas em física nuclear obriga a uma disciplina no planejamento da experiência e de um eficiente registro dos dados que deverão posteriormente reduzidos com o auxílio de computadores.

Finalmente, o estudante tem o desafio intelectual da interpretação dos seus resultados e verificar o que eles significam para o avanço dos nossos conhecimentos sobre a estrutura nuclear. Em física nuclear a separação entre um experimental e um teórico não é nítida, exigindo do experimental um bom conhecimento e compreensão das teorias e de um teórico uma certa familiaridade com as técnicas experimentais de medida a fim de poder compreender com profundidade os resultados de uma experiência.

É importante ressaltar que recentemente, a comunidade científica internacional, representada pela International Union Pure and Applied Physics (IUPAP) reconheceu o esforço e a contribuição brasileira na área de física nuclear e indicou o Brasil como sendo o primeiro país em desenvolvimento a sediar a Conferência Internacional Quadrienal de Física Nuclear.

4.1. Censo Geral e Linhas de Pesquisa

Esta seção contém os resultados de um censo, atualizado até fins de 1989, de pesquisadores e instituições mantendo vinculação direta com projetos de pesquisa e/ou instalações experimentais dedicadas na área de Física Nuclear básica. Na XI Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear, realizada em Sorocaba, 1988, foram distribuídos formulários da Sociedade Brasileira de Física com o objetivo de se fazer um levantamento sobre a "Física na década de 90". Dado, no entanto, que a resposta a esta solicitação inicial não foi suficientemente representativa, um levantamento adicional foi realizado no segundo semestre de 1989. Somente algumas instituições não forneceram os dados à Comissão que organizou este levantamento.

Baseado nestes dois levantamentos, foi possível fazer uma estatística de participação humana e de produção científica das diversas instituições onde há pesquisa em Física Nuclear no Brasil. Esta estatística está apresentada na tabela que se segue e na descrição das linhas de pesquisa de cada instituição. Os asteriscos da tabela substituem os dados que não foram fornecidos pelas instituições respectivas. Os dados possuem uma margem de erro pequena para as instituições com grande número de físicos nucleares, como a USP, UFRJ, IEAv/CTA, CBPF etc., devido à uma quantidade maior de informações disponíveis sobre estas instituições. Por dificuldades de se retroceder muito atrás no tempo e conseguir informações confiáveis (também porque as instituições têm modificado muito o seu quadro pessoal e sua estrutura interna), a produção científica (estampada na forma de trabalhos publicados em revistas científicas com árbitro e em teses de pós-graduação defendidas) se limita ao intervalo 1985-1989. Um total aproximado de 335 pesquisadores, entre doutores e mestres com vínculo

empregatício e estudantes de mestrado e doutorado, se ocupa com a Física Nuclear no Brasil.

4.1.1. Dados numéricos sobre a pesquisa em Física Nuclear no Brasil

Física Nuclear no Brasil - CENSO (1989)									
Instituição	Doutores		Mestres		Estudantes		Trabalhos Publicados (1985-1989)	Teses Defendidas (1985-1989)	
	E	T	E	T	M	D		M	D
UFPB	1	3	-	1	3	-	10	4	-
UFPE	-	3	-	-	-	2	35	3	-
UNB	-	2	-	-	-	-	8	-	-
CBPF	4	5	-	1	5	7	38	13	6
IEN	•	•	•	•	•	•	•	•	•
IEAV/CTA	1	6	4	2	1	3	41	-	-
UFF	2	1	-	-	1	-	15	-	-
UFRJ	10	11	11	3	6	4	97	10	6
IPEN	7	-	2	-	10	3	30	1	2
IFT/UNESP	-	6	-	-	5	2	38	4	-
USP	34	11	9	-	19	29	155	44	27
UFSCar	2	1	•	•	•	•	•	•	•
FUEL	2	1	•	•	•	•	•	•	•
UFRGS	-	5	-	2	4	2	13	-	-
UFSC	-	3	-	-	2	-	1	-	-
IRD	•	•	•	•	•	•	•	•	•
COPPE/UFRJ	1	5	2	5	35	20	31	35	5
UFMS	-	1	-	1	•	•	•	•	•
UFMS	-	1	-	-	•	•	•	•	•
TOTAL	64	65	28	15	91	72	511	114	46

• Dados não disponíveis

4.1.2. Linhas de pesquisa em física nuclear no Brasil

4.1.2.1. Panorama

A pesquisa experimental em física nuclear básica atualmente em curso no país se concentra fortemente em torno dos aceleradores dedicados instalados no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, embora exista também atividade importante em torno de outros centros nacionais (notadamente o Cyclotron do Instituto de Energia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, e o reator do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo). Durante os últimos anos, por outro lado, um número crescente de pesquisadores vem utilizando instalações experimentais no exterior, seja

como colaboradores em projetos de interesse comum, seja como pesquisadores principais. Tal expansão tem sido utilizada particularmente no sentido de complementar os recursos e oportunidades experimentais oferecidos pelo país, tendo sido até aqui implementada sempre a partir de iniciativas de pesquisadores individuais. Ela dá indicações objetivas no referente ao grau de maturidade e competitividade internacional alcançada na área pela comunidade científica nacional.

A existência, no campus de São Paulo da Universidade de São Paulo de um acelerador linear de elétrons e de um acelerador eletrostático de íons leves e pesados mantém estimuladas as duas grandes linhas de pesquisa que são o estudo de propriedades e fenômenos nucleares através de processos eletromagnéticos e de processos induzidos pelas interações fortes, respectivamente. Entre os primeiros também deve ser incluída a excitação coulombiana induzida por projéteis pesados. Além disso, existem no país grupos dedicados a estudos de espectroscopia nuclear fora das linhas de feixe, através da medida precisa da atividade residual de amostras preparadas quer por irradiação nos feixes dos aceleradores, quer por irradiação em outras instalações, como por exemplo, o reator do IPEN, em São Paulo. Significativamente, também, a expansão internacional tem se dado sobretudo em cada uma dessas grandes linhas de pesquisa, embora não exclusivamente nelas.

Apesar de dificuldades crônicas geradas pela insuficiência e irregularidade de recursos para suprir as necessidades de manutenção e operação dos laboratórios, as instalações dedicadas da Universidade de São Paulo têm sido utilizadas por um número significativo de usuários filiados a outras instituições do país e, embora em menor número, de países próximos (Argentina e Chile). Nesse sentido, esses laboratórios oferecem a oportunidade mais concreta e imediata de implementação, no país, das aberturas institucionais envolvendo grupos de usuários externos. Para isso, no entanto, é indispensável a criação de esquemas, também institucionais, que solucionem as limitações encontradas até aqui no que se refere a manutenção e operação.

A pesquisa teórica em física nuclear básica, por outro lado, sendo menos dependente de recursos importantes para investimento e custeio, tem uma distribuição muito menos polarizada no país e cobre um elenco muito mais diversificado de temas. Deve-se notar, no entanto, que um número relevante de posições de trabalho, especialmente no caso de Universidades Federais localizadas em regiões relativamente remotas dos centros mais bem dotados, e que têm sido ocupadas por pessoal que obteve títulos pós-graduados nesses centros, são grosseiramente deficientes mesmo diante das necessidades de um programa minimamente eficiente de pesquisa teórica. Especialmente limitantes são, nesses casos, a falta de bibliotecas atualizadas (sobretudo no setor indispensável de periódicos) e as dificuldades, muitas vezes insuperáveis mediante esforços possíveis, relativas a outros canais de informação, inclusive intercâmbio com outros centros.

Essa maior diversificação da pesquisa teórica em física nuclear tem aspectos fortemente positivos na integração da comunidade nacional ao desenvolvimento internacional da área. Em particular, existem hoje no país grupos envolvidos com as novas questões colocadas pela descrição relativística da matéria densa, e em particular com o papel que aí seja desempenhado por graus de liberdade subnucleares (vide seção 2.2). Em alguma medida, no entanto, ela reflete um desacoplamento em relação à atividade experimental que poderia ser vantajosamente reduzido com a expansão quantitativa desta última, especialmente através de programas de usuários externos aos laboratórios maiores, que estenderiam a uma parte maior do país o contato direto com resultados experimentais em primeira mão. De fato, os grupos teóricos cujas atividades de pesquisa se concentram sobre a pesquisa experimental conduzida no país têm uma distribuição geográfica tão inhomogênea quanto a dos grupos experimentais.

Finalmente, é necessário enfatizar o fato de que a existência de grupos experimentais ativos está fortemente correlacionada com a existência de grupos dedicados ao desenvolvimento tecnológico, sobretudo nos setores de instrumentação e física de aceleradores. No que se refere à instrumentação, os projetos mais sistemáticos envolvendo a utilização de laboratórios no exterior parecem exercer uma forte influência motivadora para o seu desenvolvimento, como ilustrado na subseção 4.2.3.

Um perfil genérico das atividades desenvolvidas diferentes instituições do país ligados à pesquisa em física nuclear básica é dado na tabela 4.1.2. Nessa tabela, diferentes temas de pesquisa (organizados segundo o esquema PACS) são cruzados com as instituições, identificadas pelas siglas explicitadas abaixo. À informação qualitativa contida nessa tabela podem ser associados dados quantitativos globais (i.e., caracterizando o tamanho da instituição, no que se refere à área aqui considerada) fazendo referência aos dados constantes da tabela 4.1.1.

Instituições e Siglas

UFPB	- Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa)
UFPE	- Universidade Federal de Pernambuco (Recife)
UNB	- Universidade de Brasília (Brasília, DF)
CBPF	- Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (Rio de Janeiro)
IEN	- Instituto de Energia Nuclear (Rio de Janeiro)
IEAv	- Instituto de Estudos Avançados (São José dos Campos, SP)
UFF	- Universidade Federal Fluminense (Niterói)
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro)
IPEN	- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (São Paulo)
IFT	- Instituto de Física Teórica (São Paulo)
USP	- Universidade de São Paulo (São Paulo)

- SCar** - Universidade Federal de São Carlos
- FUEL** - Fundação Universidade Estadual de Londrina (Londrina, PR)
- UFRGS** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre)
- UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina (Florianópolis)
- IRD** - Instituto de Radiação e Dosimetria (Rio de Janeiro)
- COPPE** - Coordenadoria de Programas de Pós-Graduação e Engenharia
- UFSM** - Universidade Federal de Santa Maria (Santa Maria, RS)

Tabela 4.1.2

Temas de Pesquisa (segundo PACS)	UF PB	UN PB	CB PF	IE NA	IF v	UF RJ	UF FR	UF PE	UF ET	US CA	UF SC	UF ER	UF RS	UF SC	UF RO	UF PR	UF MS
(21) <u>Estrutura Nuclear (EN)</u>																	
Espectroscopia nuclear (Exp.)			X			X	X			X							
Forças nucleares										X							
Sistemas de poucos nucleons	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X			
Modelos e métodos para EN			X							X	X						
Hipernúcleos			X									X					
Graus de liberdade subnucleares		X	X		X			X	X			X					X
(23) <u>Radioatividade e Transições eletromagnéticas</u>																	
Transições eletromagnéticas	X						X		X	X							
Decaimento β ; captura de e^- e μ^-										X							
Desintegração espontâneas			X							X							
(24-25) <u>Espalhamento e reações nucleares</u>																	
Teoria de reações		X		X		X	X	X	X	X		X					X
Reações envolvendo sist.de poucos nucleons		X	X	X	X												
Reações fotonucleares			X	X		X			X								
Espalhamento de elétrons										X			X				
Reações induzidas por ions leves (A \leq 4)			X	X	X	X				X							X
Reações induzidas por ions pesados (A \geq 4)			X	X	X	X				X							
Fissão			X			X				X							
Colisões nucleares relativísticas	X		X	X		X				X		X					X
(28) <u>Engenharia nuclear e energia nuclear</u>																	
Física de nêutrons								X									
Reatores nucleares								X									X
Tecnologia de radiação (incl.blin-dagens)				X		X											X
Radioisótopos				X		X											
(29) <u>Métodos experimentais e instrumentação</u>																	
Pré-aceleração (injeção)				X						X							
Aceleradores eletrostáticos										X							
Aceleradores lineares				X						X							
Fontes de partículas e alvos						X				X							
Espectrômetro de radiação										X							
Detectores de radiação			X			X	X			X							
Eletrônica: tratamento de pulsos				X						X							
Medida, detecção e contagem de radiação						X				X							
Processamento informação nuclear				X	X												

4.1.2.2. Exemplos Ilustrativos da Pesquisa Recente em Física Nuclear Básica no Brasil

Nesta seção estão descritos de forma muito resumida e, tanto quanto possível, não técnica, alguns resultados obtidos em projetos de pesquisa executados no país por membros da comunidade brasileira de físicos dedicados à física nuclear básica. Sendo que o objetivo é ilustrar a participação brasileira no quadro internacional da física nuclear, não se deve esperar, nos exemplos citados, um perfil completo das atividades de pesquisa no país, seja em termos de grupos em atividade, seja em termos dos assuntos tratados. Os resultados citados estão organizados em termos de assunto, sendo omitidas referências relativas a autoria e publicações.

A. Estrutura Nuclear

Fótons e elétrons são projéteis capazes de interagir com o núcleo dotados de uma característica importante - seu modo de interação com o núcleo atômico é conhecido (v. seção 1.1). Propiciam, por isso, uma maneira ímpar de perscrutar o núcleo atômico.

Uma das possibilidades de estudo consiste na pesquisa das ressonâncias gigantes nucleares, estudando a intensidade de absorção dos diferentes multipolos e seus modos de decaimento, permitindo a investigação de movimentos coletivos induzidos no núcleo pelos fótons. Utilizando-se técnicas de espectroscopia gama é possível separar os diferentes canais de decaimento. A figura 1a apresenta resultados de medida de seção de choque de reação $^{29}\text{Si}(e,p)$. A posição e a largura da ressonância (histograma de barras na figura) relacionam-se com o movimento coletivo induzido no núcleo, sendo que a distribuição de intensidade da ressonância nos diversos canais de decaimento possíveis fornece informação sobre a estrutura nuclear.

As ressonâncias gigantes também alimentam canal de fissão, particularmente em núcleos pesados. A figura 1b apresenta resultados da medida de seção de choque da reação $^{237}\text{Np}(e,f)$. Em energias acima de 30 MeV obtém-se informações a respeito dos mecanismos de fotoexcitação nuclear não coletivos, notadamente os relativos à formação do quase-dêuteron. Pode-se investigar o papel desse mecanismo na formação de um sistema nuclear equilibrado - o núcleo composto - que evolue para a fissão. Uma melhor compreensão do mecanismo de fissão é de interesse óbvio para os programas de energia nuclear.

Mecanismos de fotoexcitação nuclear em energias intermediárias, como o quase-dêuteron e a fotoprodução de píons, são sistematicamente investigados em núcleos pré-actinídeos (Bi, Pb, Au, Ta etc.), utilizando o acelerador linear do IFUSP (na faixa 20-60 MeV), e o acelerador linear de Sendai (na faixa 50-300 MeV). Entre os vários resultados obtidos destaca-se a observação experimental de uma forte dependência entre o caminho livre médio do píon foto produzido, cuja reabsorção produz um núcleo composto "aquecido", e a fissão nuclear (fig. 2).

Estudos mais específicos a respeito de algumas propriedades da fissão, em núcleos actínídeos (Th, U, Np e Pu), são realizados na região das ressonâncias gigantes (com o Linac do IFUSP) e para energias de excitação abaixo da barreira de fissão (utilizando o Linac de Gent, Bélgica). Com relação à fissão abaixo da barreira coulombiana foram obtidas, pela primeira vez, evidências experimentais indicando a existência de fissão isomérica no ^{232}Th compatível com uma barreira de fissão tripla.

A implantação em curso de sistemas computadorizados automáticos para a leitura de traços de produtos de fissão em detectores tipo CR-39 representarão uma grande economia de esforço humano e um avanço tecnológico local na área de interpretação de imagens por computador.

Fig.1a. Seção de choque de fotoabsorção por emissão de 1 ou 2 prótons (histogramas), de eletrodesintegração (quadrados), e de fotodesintegração (círculos) (dados do laboratório do Acelerador Linear).

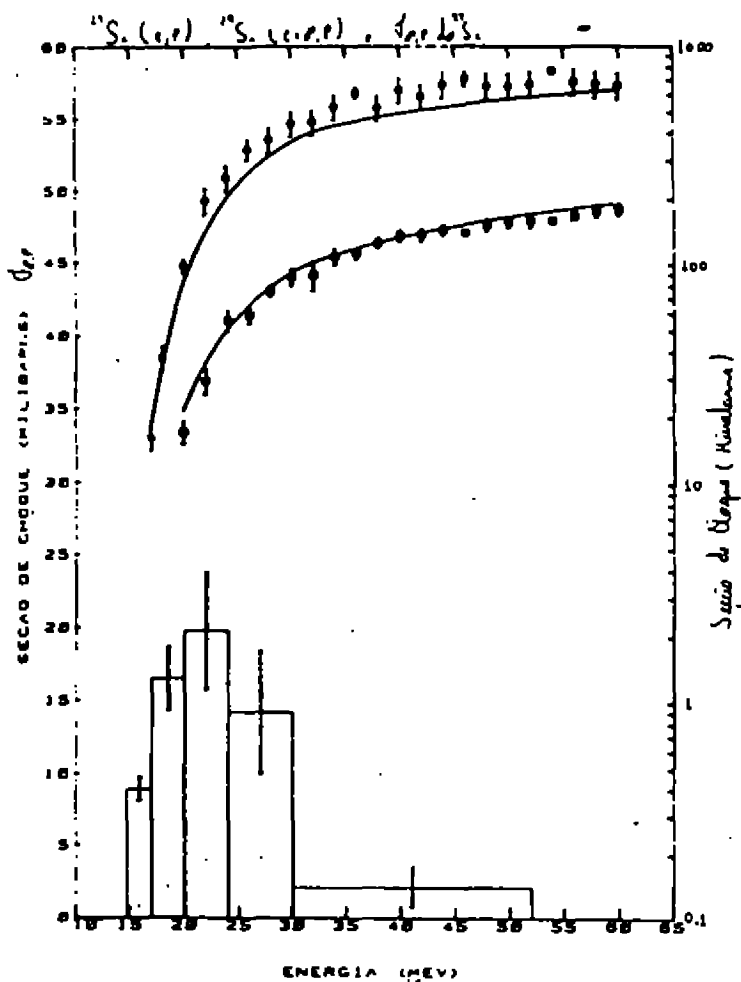


Fig.1b. Seção de choque de eletrofissão para o ^{237}Np . A curva corresponde à "seção de choque de eletrofissão pura" (dados de laboratório do Acelerador Linear).

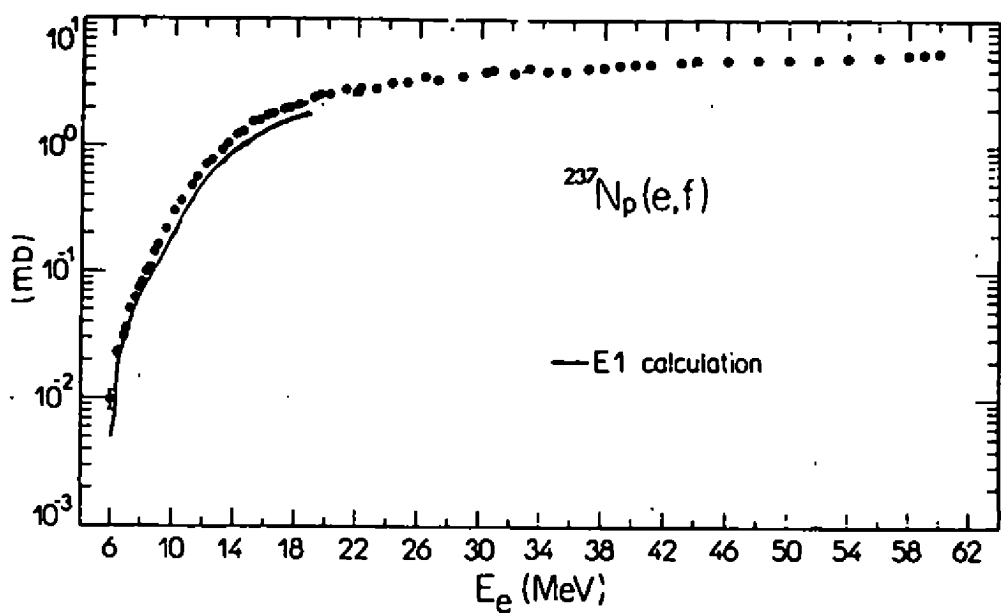
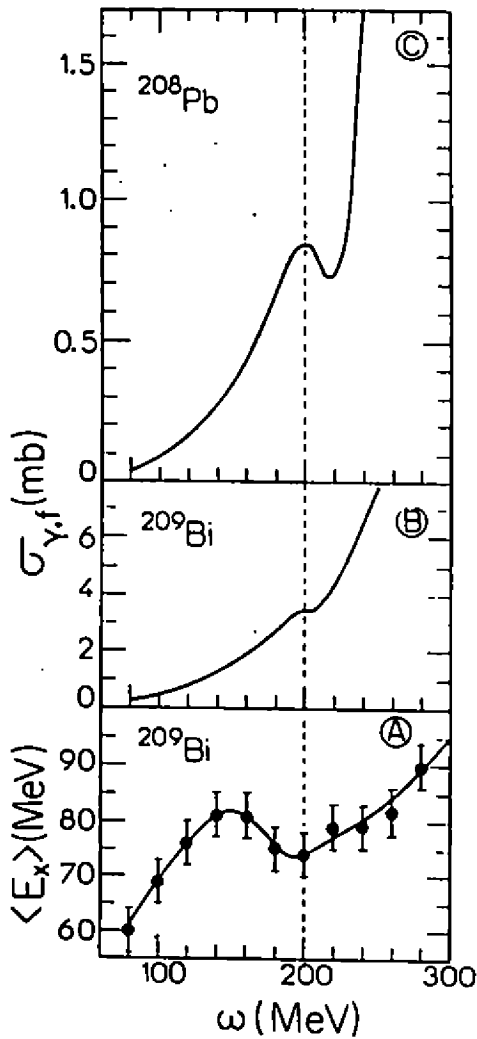


Fig.2. (A) - Resultado de um cálculo da energia de excitação nuclear E_x em função da energia do fóton incidente ω . A estrutura dessa curva decorre das características do movimento do plon fotoproduzido na matéria nuclear. (B) e (C) - Seção de choque de fotofissão, obtida experimentalmente para o ^{208}Pb e ^{209}Bi . Observa-se nitidamente a presença da estrutura atribuída aos plons.



Os avanços recentes da eletrônica e da computação têm sido incorporados aos equipamentos de espectroscopia gama existentes, permitindo estudar sistematicamente as transições gama seguindo o decaimento de radioisótopos que podem ser obtidos nos diversos aceleradores existentes. Esses estudos têm permitido completar e corrigir esquemas de desintegração, propiciando uma melhor compreensão da estrutura nuclear dos núclídeos envolvidos. A figura 3 apresenta um desses esquemas revisados. O limite de detecção em casos complexos como esse (veja figura 4 para uma apreciação da qualidade do espectro) situa-se atualmente em transições de intensidade igual a 1 para cada milhão de decaimentos do núclídeo pai. Em casos particulares, é possível ir além, o que é exemplificado pela medida do duplo decaimento gama no ^{90}Zr , que ocorre na proporção de 1 em 100 milhões de decaimentos do núcleo pai. Na medida do espectro de bremsstrahlung interno seguindo a captura eletrônica ^{55}Fe , outro fenômeno de fraca intensidade, obteve-se um valor com precisão na intensidade da ordem de 2%, reduzindo por mais de uma ordem de grandeza a incerteza nessas medidas. As duas últimas medidas citadas - duplo decaimento gama e bremsstrahlung interno - correspondem a testes da eletrodinâmica quântica que não puderam ser anteriormente efetuados em função de limitações experimentais.

A redução do limite de intensidade mínima detectável e a melhoria da precisão das medidas ensejou o desenvolvimento de técnicas de medida para baixas doses de radiação, com particular interesse na medida da radiação natural.

Os estudos de esquemas de decaimento são completados pelas medidas de correlação angular, onde busca-se a redução do limite mínimo de mistura multipolar detectável, através de medidas experimentais das respostas dos detectores e de sistemas mecânicos de posicionamento de detectores de alta precisão. O aumento da precisão permite fornecer dados espectroscópicos mais completos que por sua vez permitem testar mais profunda e detalhadamente os modelos nucleares.

Para que as medidas realizadas tivessem sucesso, envidou-se um grande esforço no desenvolvimento de sistemas interativos de aquisição e análise de dados, inclusive com a implantação de suporte gráfico. Foram efetuados extensos desenvolvimentos de hardware e software para que as técnicas descritas pudessem ser utilizadas com eficiência.

Fig.3 Esquema de decaimento do ^{159}Gd (dados do laboratório do Acelerador Linear)

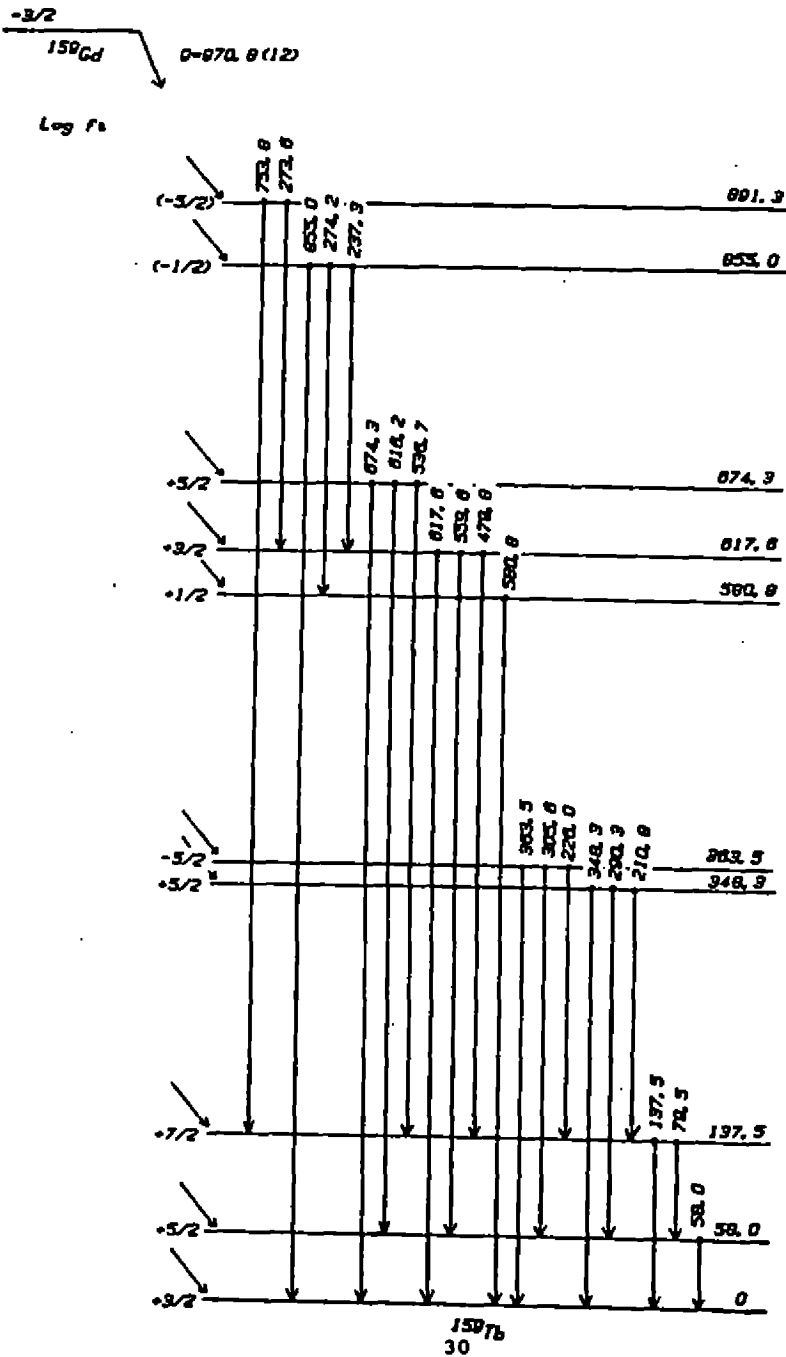
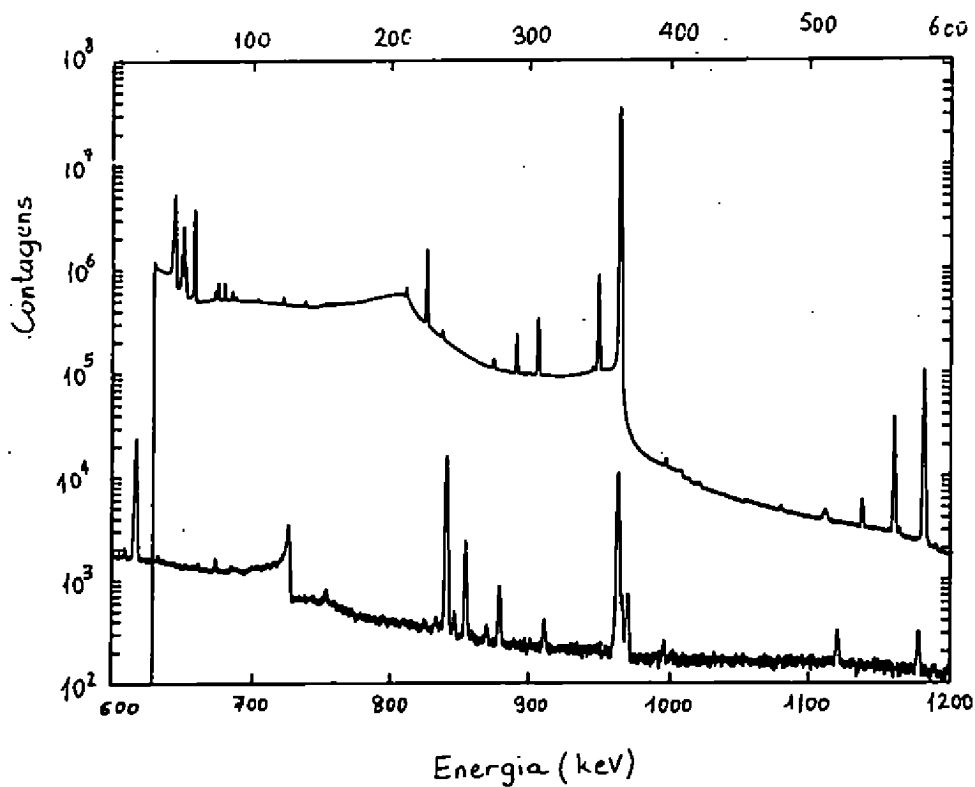


Fig.4. Espectro simples de energia do decaimento do ^{159}Gd (dados do laboratório do Acelerador Linear)



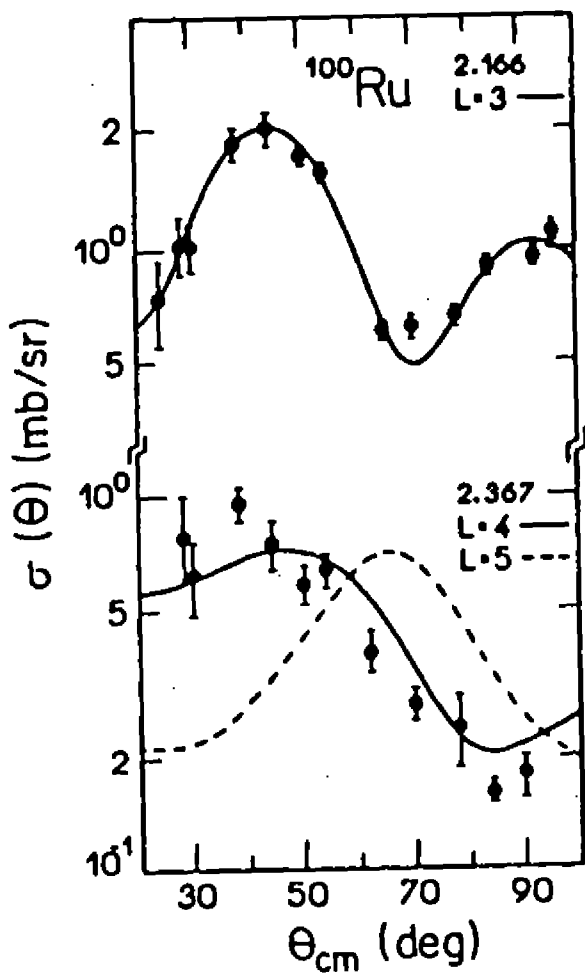
A estrutura nuclear é estudada quer com base na observação do decaimento γ de um núcleo composto altamente excitado por colisões entre fons pesados, quer por intermédio de detecção de partículas carregadas emergentes de reações induzidas por fons leves.

No primeiro caso estados de alto momento angular podem ser populados seletivamente e bandas rotacionais podem ser alimentadas. O estudo de núcleos ímpar-ímpar na região transicional ($A \approx 130$) revelou a existência de bandas rotacionais e várias bandas secundárias, e mostrou que vários destes núcleos apresentam de - formação triaxial. A figura 5 apresenta o esquema de níveis do núcleo ^{132}La , onde a existência de 2 bandas rotacionais foi revelada, sendo que a banda γ st apresenta alternância (staggering) nas energias de transição, característica destes núcleos.

Medidas de vidas médias, usando o deslocamento Doppler e de fatores g , usando campos magnéticos transientes, completam estes estudos.

A espectroscopia nuclear utilizando partículas carregadas leves (p,d, α) envolve o estudo, com ótima resolução em energia, de espalhamentos inelásticos, que salientam aspectos coletivos do núcleo, e de reações de transferência de poucos nucleons. Estas, visando informações de fracionamento de configurações simples em estados mais complicados. Os resultados referem-se à região entre os isótopos de Zr, os quais têm sob muitos aspectos característicos de núcleos semi-mágicos, atingindo a região ao redor de $A = 100$, onde poucos nucleons são suficientes para provocar uma mudança de forma. Resultado particularmente interessante, diz respeito à importância da inclusão de graus de liberdade hexadecapolares nessa região de massa, conforme revelado pela excitação direta, altamente coletiva de um estado em ^{100}Ru , pelo espalhamento de prótons, com o parâmetro de deformação $\beta_4 = 0.10$, um dos maiores reportados para qualquer região da tabela de massa (figura 6).

Fig.6. Distribuições angulares de espalhamento (p,p') no ^{100}Ru , associadas aos estados a 2.166 (3) e 2.367 (3) MeV. Dados tirados no Laboratório Pelletron.



A relevância do modelo de camadas nuclear para as camadas mais profundas pode ser demonstrada claramente através do estudo do chamado espalhamento quase livre de prótons e elétrons por núcleos complexos. Nesse processo, o projétil tem uma colisão "dura" com um dos nucleons do alvo, apenas, e a medida dos produtos finais dessa colisão permite identificar as camadas nucleares mais profundas. Contribuições cruciais para a análise de tais medidas, em particular, a adequação da aproximação de impulso com ondas distorcidas e a utilização de feixes polarizados para identificar efeitos do acoplamento spin-órbita resultaram de uma série de trabalhos bem conhecidos.

O estudo da estrutura de estados de altos spin em núcleos deformados tem despertado bastante interesse nos últimos anos. As principais propriedades destes estados estão associadas à competição entre forças de curto alcance, que tendem a emparelhar os nucleons, e a interação de Coriolis, que procura alinhar os spins dos nucleons com a rotação coletiva. Uma consequência muito interessante desta situação é o fenômeno de "back-bending", que consiste na brusca mudança do momento de inércia quando o momento angular alcança um valor crítico. Este fenômeno resulta de um cruzamento entre os níveis da banda rotacional fundamental e os da banda que contém duas partículas alinhadas, em orbitais de altos spins. Recentemente, cálculos microscópicos realísticos do tipo Hartree-Fock-Bogoliubov-cranking indicaram uma outra consequência de cruzamentos de níveis em núcleos deformados. Trata-se da inibição de transferências de pares de nucleons quando o spin final do núcleo deformado atinge determinados valores. Esta situação foi explicada em termos da fase de Berry produzida na transição, quando ela ocorre nas vizinhanças do ponto onde há o cruzamento de níveis - chamado por Berry de "ponto diabólico".

Alguns cálculos provendo a assinatura de tal processo foram realizados. Estes cálculos apresentam grandes dificuldades, por envolverem um grande número de canais. Tratamentos convencionais de canais acoplados, por exemplo, tornam-se inviáveis em colisões de sistemas muito pesados. Recentemente, foram feitas previsões de distribuições de spins finais em transferências de pares entre ^{208}Pb e os isótopos ^{160}Dy - que contém um ponto diabólico na região de spin estudada - e ^{158}Dy - que não contém pontos diabólicos. Os resultados são mostrados nas figuras 7a e 7b, respectivamente. Como referência, indicamos também, em cada caso, as probabilidades de excitação coulombiana por uma linha pontilhada. Observamos que na primeira figura, em que o processo de transferência envolve um ponto diabólico, há considerável supressão da probabilidade de transferência para estados de altos spins. Experiências para estudar estas situações estão em andamento no laboratório de Oak Ridge.

O grande aumento na precisão dos cálculos teóricos das propriedades de sistemas de poucos corpos mostrou que elas não podem ser totalmente atribuídas à interação nucleon-nucleon. Por exemplo, estudos da energia de ligação do trítio, empregando

diferentes técnicas para a solução da equação de Schrödinger e utilizam de vários potenciais realísticos de dois corpos produzem resultados que diferem sistematicamente dos valores observados. Essa multiplicidade de resultados convergentes motivou, recentemente, a investigação das contribuições dos potenciais de três corpos às propriedades de sistemas de poucos nucleons.

As forças de muitos corpos de maior alcance são as devidas a trocas de píons. Particularmente importantes, são os potenciais de três nucleons devidos à troca de dois mésons, onde um méson virtual emitido por um dos nucleons interage com um outro antes de ser absorvido por um terceiro.

No Brasil, vários aspectos das forças de três nucleons foram estudados, numa colaboração entre as Universidades de São Paulo e Recife. Em particular, foram investigados os papéis da simetria quiral e dos fatores de forma píon-nucleon no potencial devido à troca de dois píons, e o termo de Kroll-Ruderman no caso do potencial devido à troca de um píon e um ρ .

Um resultado relevante para o estudo de estrutura nuclear dentro do modelo relativístico de Walecka citamos um trabalho recém-concluído, que trata problema de emparelhamento na matéria nuclear de maneira rigorosa.

Fig. 7a. Probabilidade de transferência de 2 nêutrons em função do spin do estado final.

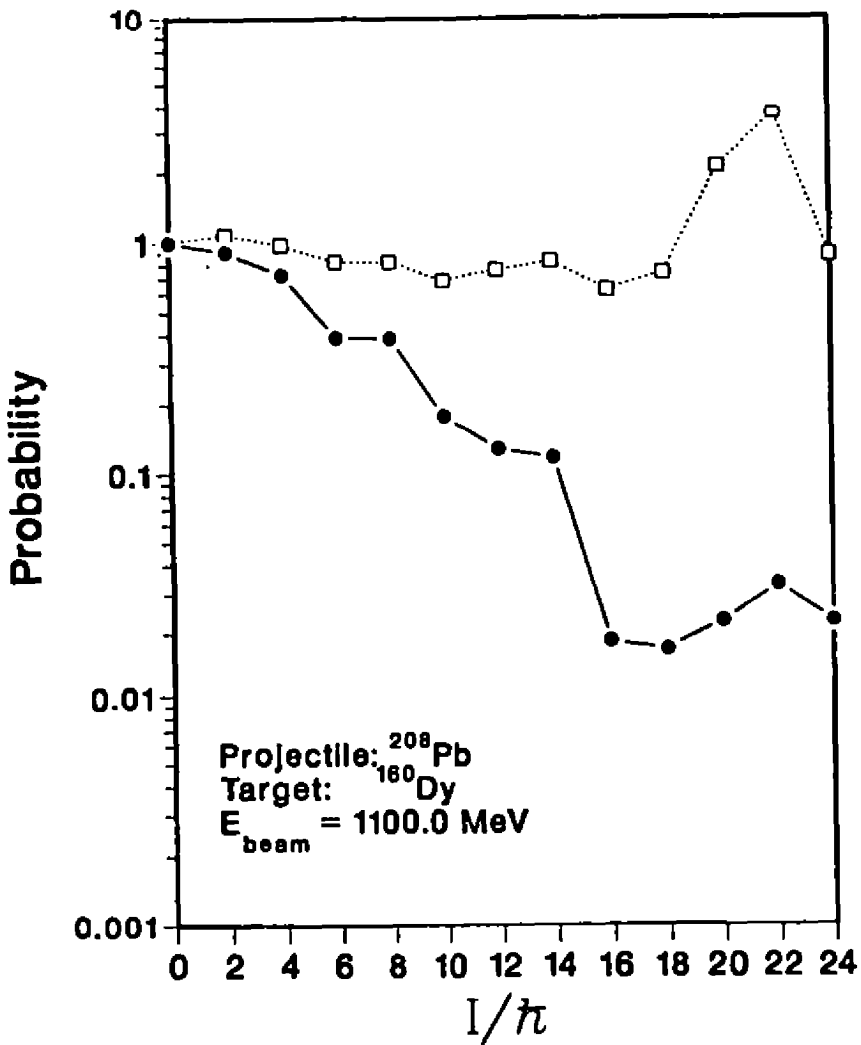
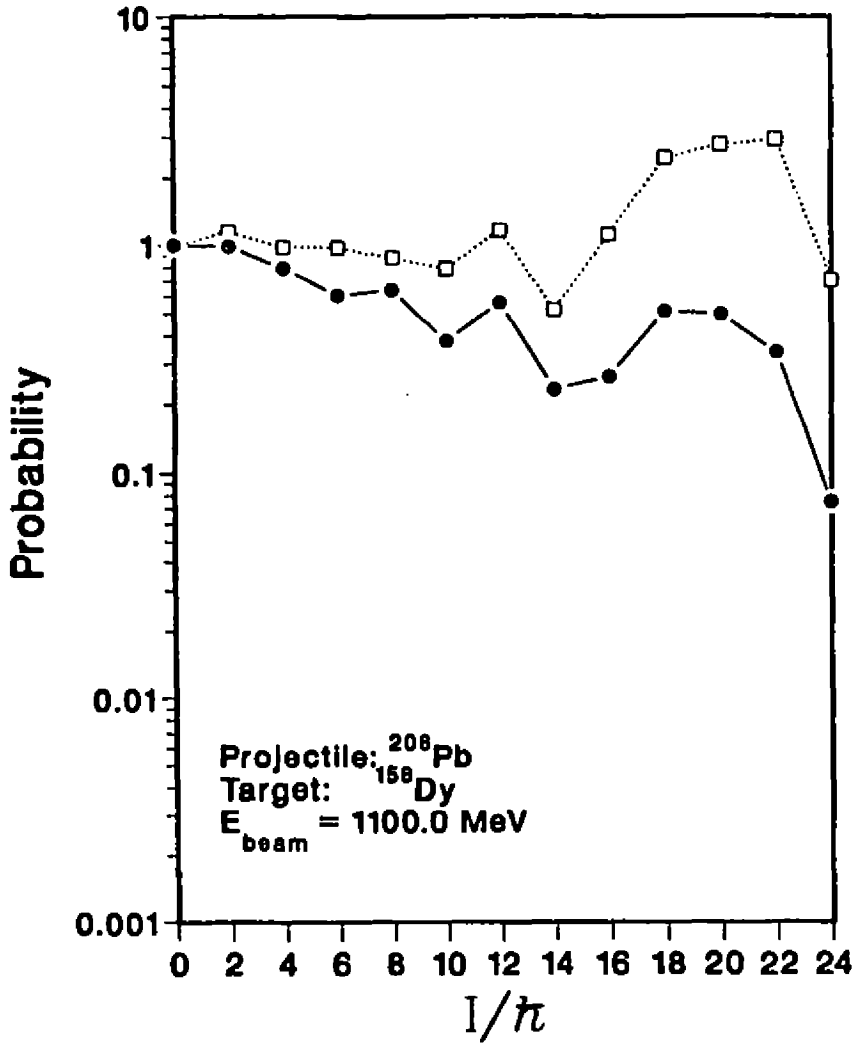


Fig.7b. Probabilidade de transferência de 2 nêutrons em função do spin do estado final.



B. Reações Nucleares

A fim de compreendermos de maneira mais profunda a dinâmica das colisões entre íons pesados, foram investigados de forma sistemática todos os canais abertos nessas colisões, que vão desde o espalhamento elástico até os processos muito inelásticos culminando com a fusão nuclear.

O estudo de processos quase-elásticos (que incluem espalhamento elástico, inelástico e reações de transferência de poucos nucleons) em núcleos da camada s-d tem como objetivos: a determinação sem ambigüidades do potencial de interação; a determinação da seção de choque total de reação usando o teorema óptico e a explicação das anomalias dos núcleos na pelo acoplamento entre canais de reação. Exemplo típico deste estudo pode ser visto na figura 8a, onde são mostradas funções de excitação apresentando as estruturas características de núcleos na juntamente com cálculos teóricos que reproduzem estas anomalias, considerando o acoplamento entre canal elástico e o canal de transferência- α . Na figura 8b são mostradas distribuições angulares completas para 6 canais de reação, juntamente com cálculos com acoplamento dos 6 canais de reação, efetuados no contexto da teoria algébrica de espalhamento de Iachello. A comparação com o resultado do cálculo do espalhamento elástico sem acoplamento, evidencia claramente que a anomalia em ângulos traseiros, manifesta em todos os canais de reação, pode ser explicada pelo acoplamento de canais de reação.

Usando as instalações do acelerador Pelletron foram medidos os espalhamentos elástico e inelástico de ^{16}O , ^{18}O e α em núcleos com Zn e Zr, analisando com canais acoplados e determinando probabilidades de transição reduzida e momentos de quadrupolo estáticos. O comportamento anômalo das distribuições angulares elásticas do sistema $^{10}\text{B} + ^{16}\text{O}$ foi também medido.

Fig.8a. Funções de excitação experimentais das reações indicadas, com cálculos teóricos (linha tracejada) considerando um potencial de polarização de transferência α (dados do Laboratório Pelletron).

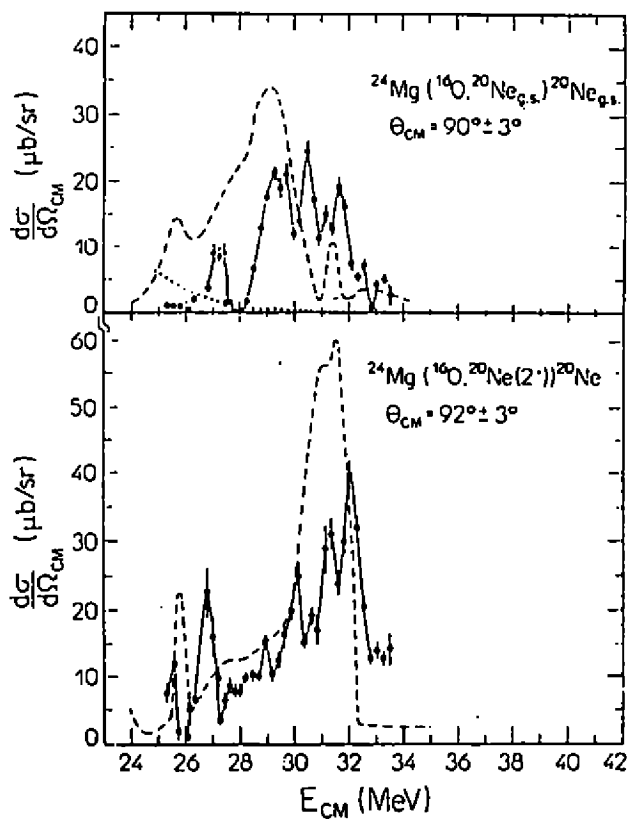
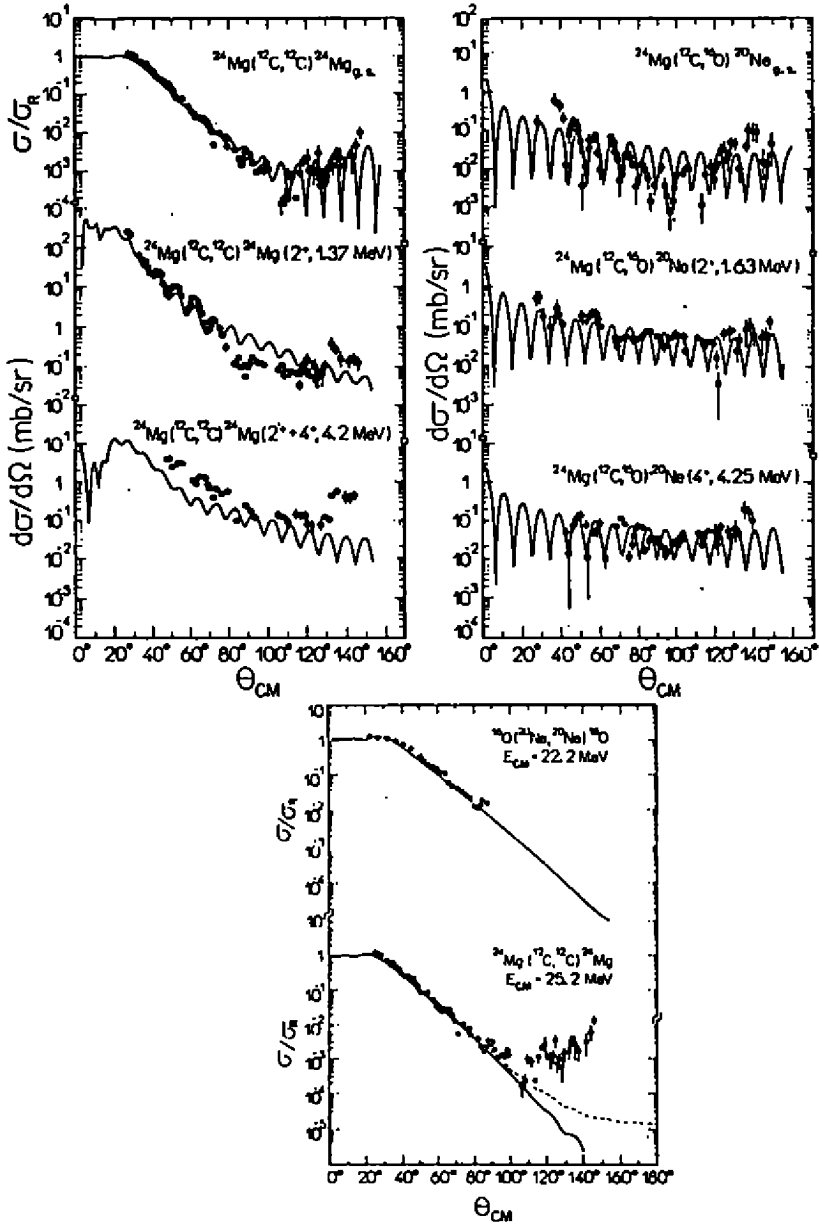


Fig.8b. Distribuições angulares experimentais das reações indicadas com resultados de cálculos, acoplando os seis canais de reação, usando teoria algébrica de espalhamento (dados do Laboratório Pelletron). Abaixo o cálculo do espalhamento elástico sem acoplamentos.



O espalhamento elástico de íons de oxigênio e carbono sobre núcleos alvo mais pesados (camada f-p) está sendo estudado em várias energias para se extrair potenciais ópticos, com o intuito de verificar a variação com a energia das partes reais e imaginárias através da relação de dispersão. Exemplo típico deste estudo está sendo apresentado na figura 9.

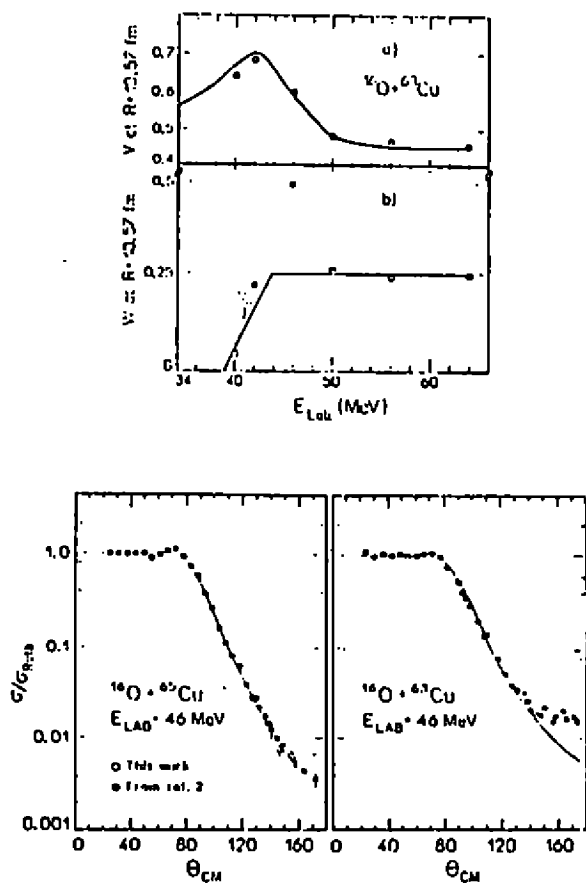


Fig.9. Variação de a) parte real e b) parte imaginária do potencial óptico em $r=10.57$ fm a linha sólida é o resultado de cálculos de relação de dispersão. Ao lado as distribuições angulares elásticas com cálculos de modelo óptico (dados obtidos no Laboratório Pelletron).

Aumentando o grau de complexidade e de inelasticidade na colisão de processos altamente dissipativos em energia, mas com pouca transferência de massa e de carga, ocorrem entre íons pesados leves. A competição entre colisões altamente dissipativas, processos periféricos e a fusão completa está sendo investigada. O efeito da assimetria de massa no canal de entrada também é objeto de estudo, assim como a equilibração de massa e carga nos processos altamente inelásticos. Dados sistemáticos obtidos no laboratório Pelletron mostram uma forte correlação entre o Fator de Inibição da Fusão (FIF) e o parâmetro de assimetria de massa η . A inibição observada se reflete na seção de choque para os processos binários altamente inelásticos afetando inclusive as escalas de tempo dos processos. Medidas realizadas que identificam simultaneamente o número atômico e o número de massa permitem caracterizar o grau de equilíbrio assim como o efeito da assimetria de massa e isospin.

Um outro aspecto observado corresponde à constância da seção de choque máxima de fusão para uma variedade muito grande de sistemas, isto é, $30 < A_{NC} < 80$.

Um exemplo típico sobre a competição deste processo com a fusão completa pode ser visto na figura 10, onde se verifica que a seção de choque de fusão do $^{10}\text{B} + ^{10}\text{B}$ é 40% menor do que se espera, sendo que a seção de choque foi desviada para o canal de formação de um complexo binário altamente excitado.

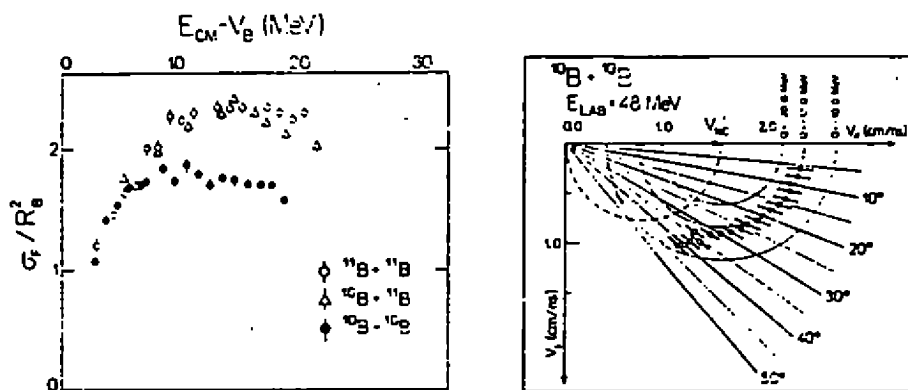


Fig.10. Seção de choque reduzida de fusão para os sistemas $^{10}\text{B} + ^{10}\text{B}$, $^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$ e $^{11}\text{B} + ^{11}\text{B}$. Ao lado, a velocidade média dos produtos de fissão com $Z=5$.

A fusão completa de sistemas leves e pesados, em energias que vão da barreira coulombiana até em bem acima dela, levando à formação de um núcleo composto estatisticamente equilibrado, é estudada por vários grupos no laboratório Pelletron. Para sistemas mais pesados as características coletivas dos reagentes se mostram relevantes, afetando a probabilidade de fusão essencialmente em energias próximas à barreira coulombiana. Um exemplo típico, apresentado na figura 11 mostra a seção de choque de fusão completa juntamente com cálculos de modelo unidimensional de penetração de barreira, que visivelmente subestima a seção de choque de fusão abaixo da barreira coulombiana. Quando a deformação estática do alvo, acoplada a algum canal de reação, é levada em conta, o aumento da seção de choque é explicado, como pode ser visto na figura 11.

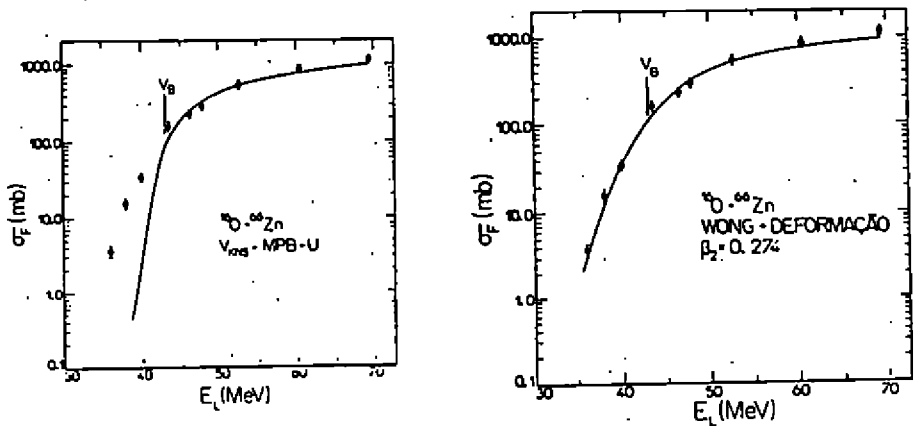


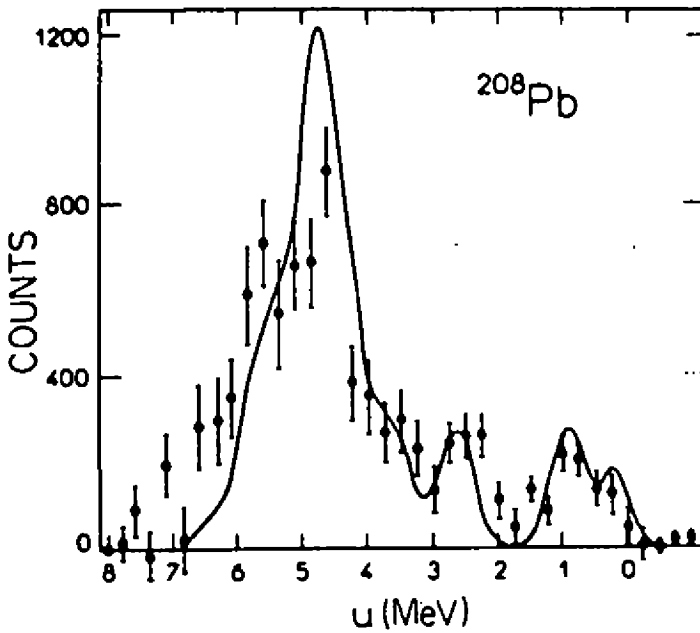
Fig.11. Função de excitação da fusão nuclear do $^{16}\text{O} + ^{66}\text{Zn}$ e a previsão do modelo unidimensional (figura à esquerda). Modelo de Wong, com deformação estática (figura à direita).

No caso de sistemas leves a estrutura de partícula independente dos participantes é importante na determinação da seção de choque de fusão em energias acima da barreira, sem que a fusão subcoulombiana mostre uma dependência isotópica significativa.

As ressonâncias multipolares gigantes em núcleos são modos vibracionais fortemente coletivos cuja imagem microscópica, desde um trabalho clássico de Brown e Bolstuli no início da década de 50, é a de uma superposição coerente de excitações de um nucleon. Progressos relativamente recentes de técnicas experimentais permitiram o estudo experimental detalhado do decaimento dessas excitações por emissão de nucleons. Devido ao peso da interpretação microscópica mencionada, estruturas observadas nos espectros resultantes eram sistematicamente atribuídas ao escape direto dos nucleons de maior energia associados às excitações constitutivas do modo coletivo. Uma série de trabalhos realizados nos últimos cinco anos no país mostrou, no entanto, que tal estrutura é pelo contrário essencialmente atribuível, em núcleos pesados, a efeitos de espaço de fases no decaimento estatístico de um núcleo composto equilibrado, com os números quânticos e a energia de excitação do modo coletivo (v. figura 12). Uma análise teórica detalhada permitiu ainda compreender a interrelação, vinculada por condições de unitariedade, entre o decaimento estatístico e o direto, cuja competição pode ser esperada no caso de sistemas mais leves, bem como o possível efeito de decaimento em estágios anteriores à completa equilíbrio do núcleo composto.

Já é um fato aceito que numa colisão central entre dois íons pesados em energias intermediárias ($E_{\text{Lab}} = 20\text{-}200$ A MeV) são produzidos fragmentos complexos ($Z \geq 3$) em grande número. O mecanismo (ou mecanismos) de produção destes fragmentos não foi ainda estabelecido e a sua procura representa um dos maiores desafios da física nuclear atual. A compreensão deste(s) mecanismo(s) é um estágio essencial para a extração das propriedades da matéria nuclear em densidades próximas à densidade de saturação e, como consequência, da equação de estado da mesma.

Fig. 12. O espectro de nêutrons de energia de excitação de 14 MeV em ^{208}Pb com uma resolução de energia de 500 keV é indicado pelos pontos. O espectro calculado é normalizado ao espectro experimental e é indicado pela linha contínua.



Dentre a grande diversidade de propostas teóricas, algumas, com contribuição importante de grupos brasileiros, consideram que a produção de fragmentos ocorre de maneira sequencial (evaporações e/ou fissões sucessivas), em outras esta produção é simultânea (explosão coulombiana do núcleo ou condensação de um gás de nucleons em gotículas). O fato de não ser ainda possível realizar uma seleção entre teorias tão díspares através dos dados experimentais disponíveis ilustra claramente a necessidade de um grande esforço experimental e teórico a ser realizado nos próximos anos.

O processo de excitação coulombiana relativística foi estudada formalmente e aplicado ao estudo da excitação de ressonâncias gigantes, as quais decaem quase sempre por emissão de nucleons, levando assim à fragmentação dos núcleos. A figura 13 mostra um exemplo, onde se vê claramente a importância da excitação coulombiana na fragmentação nuclear, já na energia de 1 GeV/nucleon.

Também importante, neste processo, é a possibilidade de se excitar estados de multifônons, isto é, excitações de ressonâncias gigantes superpostas. Devido à grande amplitude de vibração destes estados coletivos, espera-se que vários fragmentos exóticos sejam emanados do projétil e/ou alvo excitado.

Além disso, a dissociação coulombiana pode ser um método alternativo, e talvez único, de se obter informações sobre reações de captura radioativa de interesse em astrofísica, como por exemplo a reação $\alpha + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ a energias térmicas estelares (< 1 MeV).

O estudo de processos hadrônicos sem a necessidade de se ter uma colisão frontal entre os núcleos relativísticos também é de grande interesse (veja figura 14). A produção do bóson de Higgs, em anéis de colisão, por exemplo, foi estimada como sendo da ordem de 1nb, ou seja, igual ao que se obtém na interação gluon-gluon. Com detectores de "veto" apropriados a detecção de Higgs poderia ser muito mais "limpa" do que nos processos de colisão hadrônica.

Fig. 13. Seção de choque para remoção de 1 nucleon de ^{197}Au por meio de ions pesados relativísticos. $N(C)$ deve-se a processos nucleares (coulombianos).

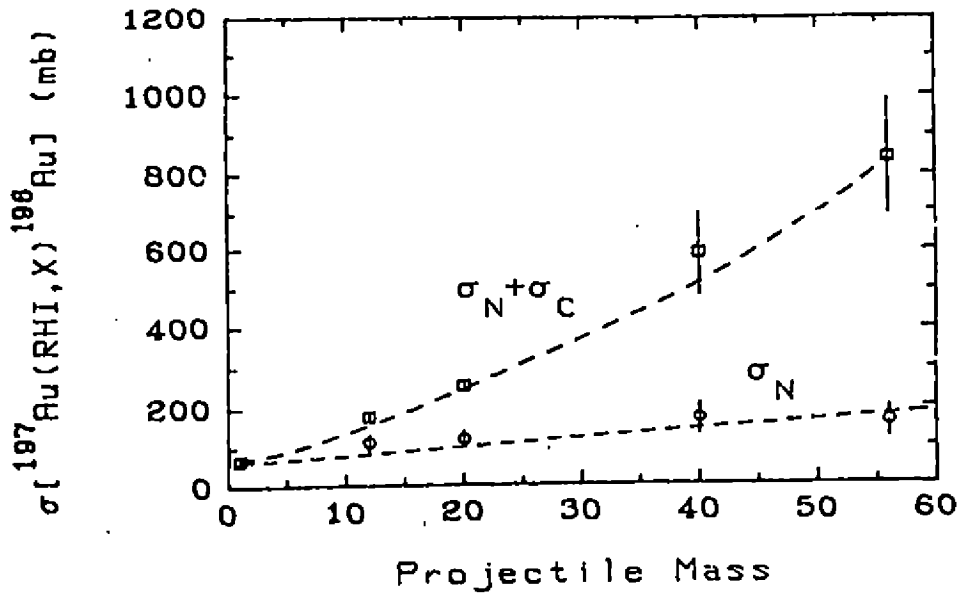
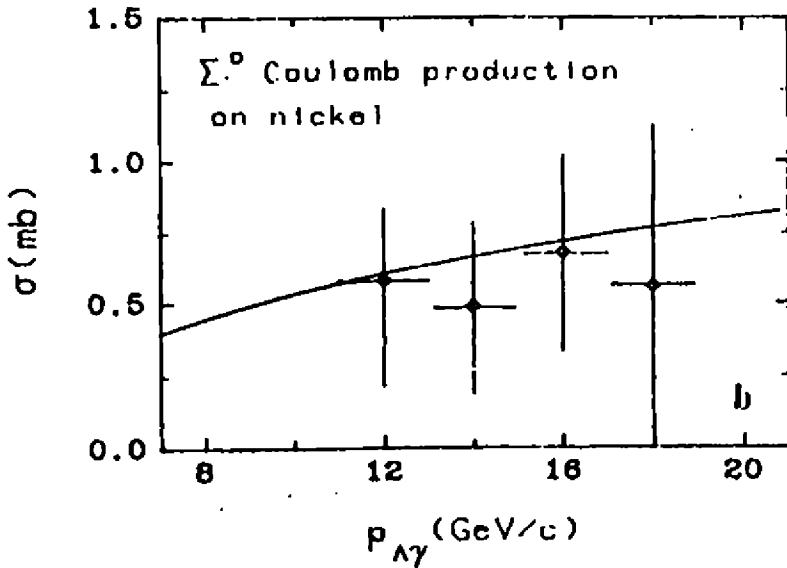
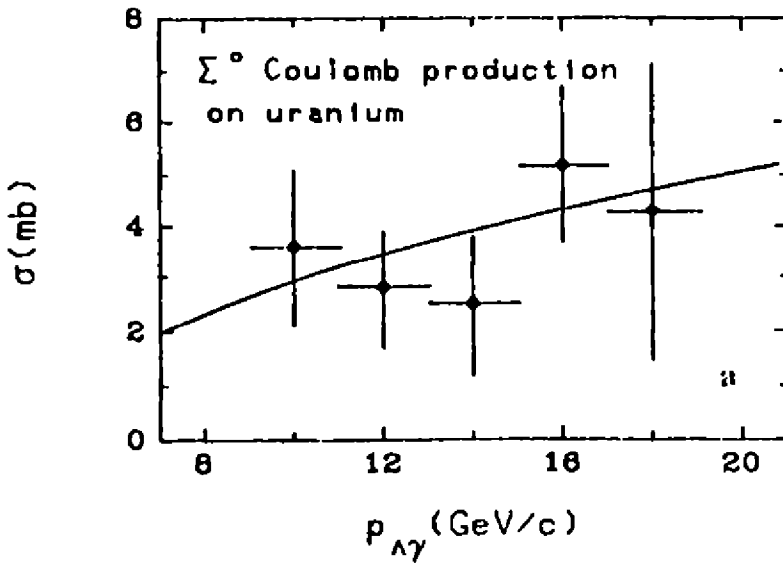


Fig. 14. Seção de choque de Primakoff para produção de Σ^0 a partir da interação coulombiana entre feixes de Λ (20 GeV por nucleon) incidentes em níquel e em urânio.



Reações nucleares envolvendo núcleos pesados em energias relativísticas com pequena transferência de momento (e.g. excitações coulombianas) foram tratadas teoricamente de forma covariante dentro de um contexto de teoria de campos. No caso da excitação coulombiana foram obtidas descrições excelentes dos dados experimentais existentes e feitas medições sobre seções de choque para excitação múltipla (i.e., envolvendo vários fônons). Estas últimas deverão ser medidas em futuro próximo no acelerador do GSI, Darmstadt.

Do ponto de vista da Cromodinâmica Quântica, o fenômeno de produção múltipla de hádrons envolve, de forma essencial, os aspectos não linear e não perturbativo da teoria. Assim, no presente momento, qualquer estudo teórico necessariamente recorre a modelos fenomenológicos.

Nesta linha de pesquisa, foi construído um modelo fenomenológico simples de colisão hádron-hádron, visando a aplicação do mesmo a processos mais complexos, tais como colismes hádron-núcleo e núcleo-núcleo.

O modelo consiste de duas partes: primeira, a formação de bolas de fogo (objeto estatístico) via mecanismo de fragmentação de uma corda efetiva e, segunda, o processo de decaimento das bolas de fogo em hádrons observáveis.

Numa colisão de hádron-hádron, a formação de uma corda difere daquela do processo de aniquilação de e^+e^- , devido à estrutura complexa dos hádrons. Assim, foi introduzida uma corda efetiva, cuja constante K , em média, depende do parâmetro de impacto e da energia incidente. Utilizando o argumento de "scaling" geométrico, a dependência de K com a energia incidente foi determinada formando K proporcional à seção de choque total $\sigma(\sqrt{s})$.

O modelo, apesar de sua simplicidade, reproduz os espectros de partículas produzidas (figuras 15 e 16) numa larga faixa de \sqrt{s} (20 GeV à 1 TEV).

A duplicação direta deste modelo para processos $p+A$ e $\alpha+\alpha$ deu resultados também bastante satisfatórios.

Fig.15. Espectro de partículas emitidas em colisão p-p.

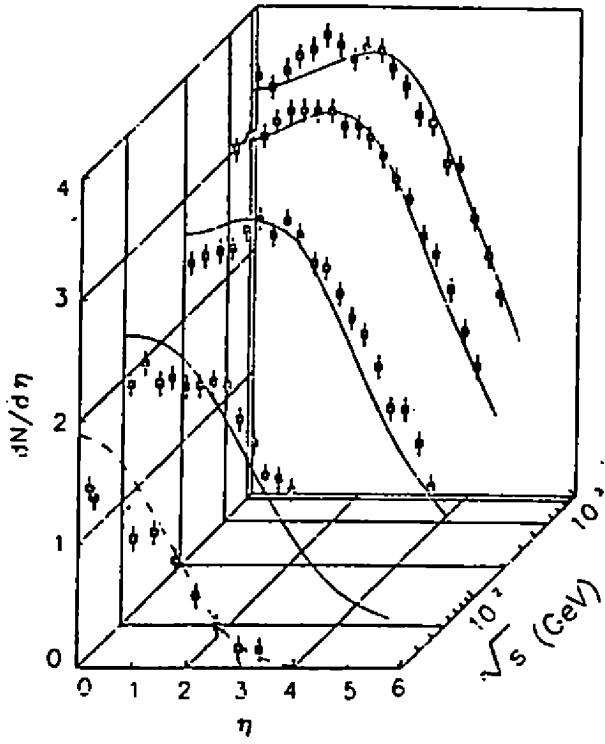
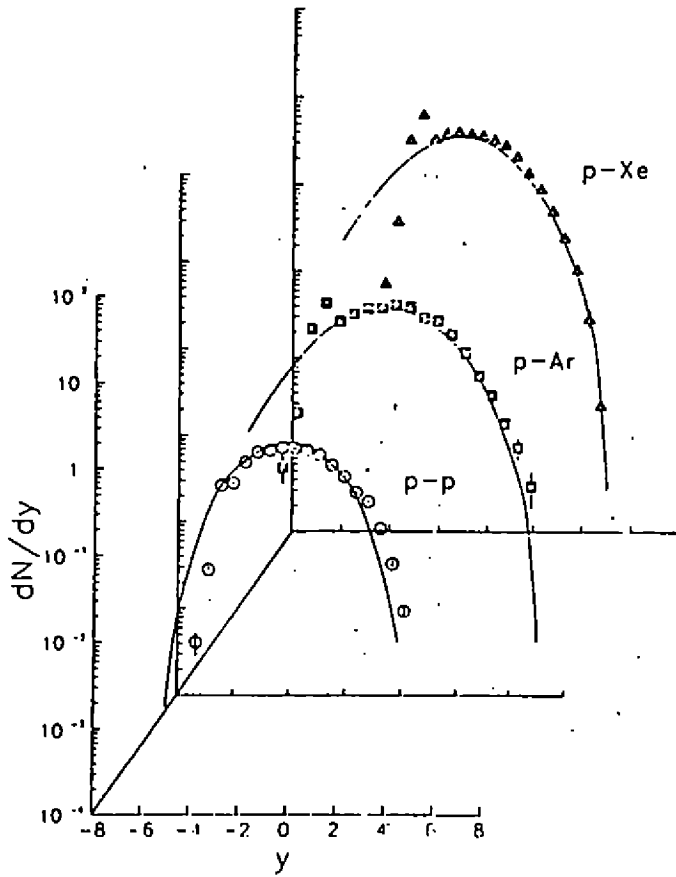


Fig.16. Espectro de partículas emitidas em colisão p-A.



4.2. Principais Laboratórios Dedicados

4.2.1. Laboratório do Acelerador Pelletron do IFUSP

Como parte de um programa de desenvolvimento de pesquisas em física nuclear em São Paulo, no início da década de 50 foi construído um acelerador eletrostático, tipo Van de Graaff, que atingiu diferenças de potencial de 3.8 MV. Este acelerador, o primeiro construído no hemisfério sul, permitia a aceleração de prótons, deutérios e partículas alfas nos modos contínuo ou pulsado. Foi amplamente utilizado até o início da década de 70 nas pesquisas em física nuclear e na formação de físicos experimentais e técnicos especializados.

Em 1972 foi instalado o acelerador Pelletron, uma máquina eletrostática tipo "tandem", porém, utilizando uma tecnologia inédita e que permite atingir no terminal diferenças de potencial até 8 MV.

O laboratório possui oficina mecânica de apoio para a fabricação de algumas peças de reparo do acelerador, construção de equipamentos especiais para os projetos de pesquisa e construção das partes mecânicas de equipamentos de uso rotineiro, no laboratório. O setor de eletrônica possui duas oficinas. Uma dedicada à manutenção, projetos e desenvolvimento de instrumentação eletrônica analógica, e outra dedicada à manutenção e desenvolvimento de instrumentação eletrônica digital. Estas oficinas contam com o apoio de engenheiros e técnicos qualificados.

Para o preparo dos alvos nucleares possui um laboratório de alvos com adequado apoio instrumental e técnico. Este setor conta com o apoio de físicos, químicos e técnicos especializados.

Possui o laboratório uma divisão com físicos, engenheiro e técnicos especializados para a manutenção e desenvolvimento do acelerador Pelletron. Neste setor são desenvolvidos novos modelos de fonte de íons, sistemas de controle do acelerador, compressores de feixe, melhoria na óptica eletrônica do feixe e construção de lentes eletromagnéticas para o feixe.

Tradicionalmente o laboratório tem mantido também uma linha de pesquisa e desenvolvimento em tecnologia de alto vácuo e com a instalação do Pelletron foi pioneiro na utilização de técnicas de ultra-alto-vácuo. Neste setor, além do serviço de manutenção, são desenvolvidos e construídos equipamentos para ultra-alto-vácuo e sistemas de controle das estações de vácuo do acelerador.

O programa de manutenção e desenvolvimento no laboratório do acelerador Pelletron permitiu a formação de um grupo de técnicos altamente especializados e dedicados. O número total de técnicos de apoio e manutenção do laboratório é de 12 pessoas.

- Um importante setor de apoio às pesquisas é o de computação. O laboratório possui como "main frame" um computador VAX/780, que além de utilizado para aquisição e redução de dados obtidos via acelerador, é de uso geral em computação. Em 1970 foi desenvolvida uma interface para aquisição de dados (SADE) que hoje evoluiu em dois sistemas independentes: o SPM que utiliza eletrônica NIM e outro que corresponde a um sistema CAMAC multiparamétrico que está em evolução com um sistema VME.

O laboratório possui atualmente como equipamento principal um acelerador eletrostático tipo tandem com potencial no terminal de até 8 MeV. Da fonte de íons acoplada tem se utilizado feixes de íons desde H⁺ até Cl⁻. Íons mais pesados podem também ser extraídos, mas devido à energia máxima do terminal disponível atualmente a utilização destes feixes é de interesse limitado. O laboratório possui ainda duas áreas experimentais que abrigam sete linhas de feixe nos quais estão montados, respectivamente:

- a) câmara de espalhamento para medidas de tempo de voo de partículas pesadas;
- b) câmara para medidas de radiação gama e correlações angulares gama-gama;
- c) espectrógrafo magnético do tipo "Enge-split-pole";
- d) câmara de espalhamento de aproximadamente 70 cm de diâmetro para detecção de partículas carregadas;
- e) uma câmara de espalhamento multiuso de grande porte com diâmetro de 1m;
- f) o espectrômetro de massa para detecção de produtos pesados de reação;
- g) sistema de detecção dedicado a medidas envolvendo a técnica PIXE (Proton induced X-ray....).

Este laboratório, que teria hoje um custo de instalação de aproximadamente US\$ 8 milhões, necessita US\$ 1,5 milhões para sua operação e manutenção anual. Entretanto, os recursos efetivamente realizados até aqui estão muito aquém deste valor o que tem trazido consideráveis contratempos e prejuízos para sua plena utilização. Já para as linhas experimentais atuais seria necessária uma verba anual de US\$ 0,5 milhões para sua atualização.

Em 1982, foi apresentada uma proposta de expansão do Acelerador Pelletron da Universidade de São Paulo. O projeto foi amplamente discutido em várias reuniões da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), Sociedade Brasileira de Física (SBF) e em reuniões promovidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com as agências de financiamento. Ele tem como meta expandir o campo de pesquisa do laboratório existente de forma que a permutar o aproveitamento integral do "know-how" existente tanto do ponto de vista científico, como tecnológico. Ao mesmo tempo é importante a introdução no país de uma tecnologia de fronteira na área de aceleradores.

Dentre as várias opções estudadas a solução mais satisfatória se mostrou ser a construção de um Linac supercondutor, onde o material supercondutor é o nióbio e as

cavidades ressonantes de $1/2$, do tipo "split-ring". Para facilitar o projeto e encurtar o prazo necessário para a entrada em operação do pós-acelerador ele será desenvolvido em colaboração com o Argonne National Laboratory (ANL-USA), que desenvolveu o primeiro Linac desse tipo. Este projeto permitirá uma evolução natural dos programas de pesquisa graças ao aumento da energia das partículas e à microestrutura do feixe. Por outro lado, se criaria a oportunidade no país para o desenvolvimento industrial da supercondutividade.

O feixe injetado pelo acelerador tandem atualmente em operação seria comprimido em pulsos de 100 ps em dois estágios. A eficiência total esperada é de 70%. O acelerador Linear será composto por uma seqüência de estruturas aceleradoras com fases independentes. Inicialmente, seriam instaladas 13 cavidades ressonantes com $0,06 < \beta < 0,105$, que trabalham sintonizadas na freqüência de ~ 96 MHz. A injeção de feixes de íons altamente ionizados nos ressoadores, que podem atingir campos de aceleração de até 3 MeV/m, permite a obtenção de feixes de alta energia sem deteriorar a qualidade óptica do feixe do Pelletron.

A fim de melhor atender ao programa de pesquisa que apresenta maior interesse aos pesquisadores, decidiu-se que na fase inicial, a configuração mais satisfatória para o LINAC será com 13 ressoadores alojados em dois criostatos. No primeiro criostato a configuração deverá ser de 3 ressoadores de β -baixo ($\beta=0,06$) e 4 ressoadores de β -elevado ($\beta=0,105$) intercalando-se 3 lentes super-condutoras de focalização. No segundo criostato serão instalados 6 ressoadores de β -elevado e 3 lentes supercondutoras.

Para o detalhamento do programa de pesquisa utilizando o Pelletron-Linac, e definição precisa dos equipamentos necessários para o desenvolvimento dessas pesquisas estão sendo realizadas, com regularidade, reuniões onde participam pesquisadores de vários laboratórios brasileiros. Essa cooperação e utilização do sistema Pelletron-Linac por pesquisadores de vários laboratórios se constitui numa excelente experiência de aprendizado para a operação dos futuros laboratórios nacionais.

Os vários grupos de pesquisa que utilizam o Laboratório Pelletron investigam todos os canais abertos nas colisões entre íons pesados, indo do espalhamento elástico até os processos muito inelásticos culminando com a fusão nuclear.

Desta forma, além da determinação sistemática de potenciais complexos, que permitem determinar a seção de choque de reação de sistemas numa gama bastante ampla, são considerados de forma explícita os acoplamentos a canais de reação. Em alguns casos, uma descrição semi-microscópica desta dinâmica pode ser proposta (isto é, espalhamento múltiplo de partículas α). Neste contexto, várias teorias são contempladas (isto é, canais acoplados, potencial de polarização, teoria algébrica etc.). Medidas da seção de choque de processos quase-elásticos (isto é, transferência de poucos nucleons) complementam este estudo.

Por motivos óbvios, impostos pela limitação em energia do acelerador Pelletron, estes estudos se concentraram em sistemas nucleares leves e de peso médio.

Na faixa de energia, que será disponível com o pós-acelerador, isto é, até algumas dezenas de MeV por nucleon, a dinâmica das colisões entre íons pesados ainda possui uma forte correlação com a estrutura nuclear dos núcleos participantes. O programa de pesquisa a ser desenvolvido contemplará duas grandes linhas: a) mecanismo das reações entre íons pesados; b) estrutura nuclear.

Atualmente, com as energias disponíveis no acelerador Pelletron, o processo mais provável corresponde ao da fusão completa entre o projétil e o alvo, levando à formação de um núcleo composto estatisticamente equilibrado. Para sistemas mais pesados, que serão investigados com o novo Linac, as características coletivas dos reagentes podem afetar a probabilidade de fusão essencialmente em energias próximas à barreira coulombiana. Em energias mais elevadas, as características macroscópicas (geométricas) determinam sistematicamente a seção de choque de fusão. No caso de sistemas leves (isto é, núcleos s-d) a estrutura de partícula independente dos participantes é importante na determinação da seção de choque de fusão, em energias acima da barreira, sem que a fusão subcoulombiana mostre uma dependência isotópica significativa.

Processos intermediários (fragmentação nuclear e processos altamente dissipativos) também serão investigados de forma sistemática.

A estrutura nuclear será estudada essencialmente com base na observação do decaimento γ de um núcleo composto altamente excitado. Desta forma, estados de alto momento angular podem ser populados seletivamente e bandas rotacionais podem ser alimentadas. Utilizando esta técnica, a terminação ou mesmo o cruzamento de bandas, que determinam os "backbendings", podem ser observadas e investigadas. As terras raras apresentam-se como excelente campo de trabalho devido a suas claras características rotacionais e altas deformabilidades. As variações da forma nuclear (triaxiais ou não) são correlacionadas aos "backbendings". Medidas de vidas médias e fatores-g completam este estudo.

Não podemos deixar de mencionar a importância de pesquisas que aplicam técnicas nucleares na caracterização de materiais que já estão sendo efetuadas há algum tempo no laboratório. A utilização do acelerador Pelletron através do método PIXE para estudos ambientais, na análise de centenas de amostras de aerossóis coletados no país inteiro se constitui num exemplo.

Um programa de pesquisa dinâmico e abrangente como o aqui apresentado acima exige um grande investimento em instrumentação. Uma grande variedade de detectores de radiação nuclear já são desenvolvidos no laboratório Pelletron, como por exemplo contadores proporcionais, câmaras de ionização, seletores eletrostáticos e magnéticos, detectores de tempo etc..

Entretanto, o novo programa de pesquisa e as características do feixe do Linac exigem o desenvolvimento de novos sistemas de detecção e equipamentos periféricos.

Todos estes grupos de apoio, incluindo a equipe de manutenção que já participa num programa de desenvolvimento e pesquisa em aceleradores nucleares, estarão contribuindo também, de forma significativa, na programação do projeto Linac.

De forma geral o orçamento da primeira fase consiste de:

- US\$ 1.1 milhões - concedidos pelo BID para a construção das cavidades supercondutoras;

- US\$ 550 K - concedidos pela FAPESP para o sistema de refrigeração (hélio líquido);

- US\$ 1.5 milhões - solicitados à FINEP para a construção dos criostatos, linha de distribuição de hélio líquido, eletrônica de r.f. e sistema de compressão do feixe;

- US\$ 1.6 milhões - solicitados ao BID e Secretaria de Ciência e Tecnologia para a construção do prédio.

Tabela 4.2.1. Custos e prazos para o projeto de expansão do Acelerador Pelletron. Os custos são expressos em unidades de US\$10⁶.

1ª Etapa - 13 cavidades ressonantes. Prazo: 30 meses (a partir de 01/01/90)			
Item	Custo Estimado	Financiamento Aprovado	Fonte
Cavidades supercondutoras	1,1	1,1	BID
Sistema de refrigeração	0,55	0,55	FAPESP
Criostatos+Sistemas e Eletrônica de RF	1,5	1,5 ^(*)	FINEP
Prédio	4,5	0,4	BID
Atualização do sistema de aquisição de dados	0,1	0,1	FAPESP
Instalação	1,0	-	-
Periféricos (linhas de feixe e câmaras de espalhamento)	0,7	-	-
Detetores (gás, semicondutores)	0,7	0,1 ^(*) 0,1	FAPESP FINEP
T O T A L	10,65	5,05	

^(*) Pedido em tramitação em Janeiro de 1990.

Tabela 4.2.1. (continuação)

2ª Etapa - 20 cavidades ressonantes. Prazo: 40 meses (após conclusão da 1ª fase)	
Item	Custo Estimado
Cavidades supercondutoras	3,2
Criostatos	0,6
Criostato para ensalo	0,1
Dewar de 1000l	0,1
Ampliação do sistema de distribuição de LN ₂ e LHe	0,25
Eletrônica	0,3
Linhas de feixe	0,7
Periféricos e dectores	1,0
Desenvolvimento	2,0
T O T A L	8,25

Dentro do prazo de 16 meses o prédio que alojará o Linac deverá estar construído e no prazo de 30 meses as 13 cavidades deverão estar disponíveis.

Uma segunda fase prevista para os 50 meses seguintes estenderá o sistema para um acelerador equivalente a um tandem de ~ 45 MeV com a construção de 24 novos ressoadores em 4 criostatos. Um orçamento preliminar segue (convém ressaltar que nenhum item foi ainda financiado).

ORÇAMENTO DA SEGUNDA FASE

1. construção e desenvolvimento de ressoadores (18 a 20).....	US\$ 3.2 M
2. construção de 3 criostatos grandes.....	US\$ 0.6 M
3. construção de 1 criostato para ensaios.....	US\$ 0.1 M
4. dewar de 1000l.....	US\$ 0.1 M
5. ampliação do sistema de distribuição de LN e LHe.....	US\$ 0.25M
6. eletrônica Linac.....	US\$ 0.3 M
7. linhas de feixe (Linac para área experimental - ímãs, 4-polos, bombas etc.).....	US\$ 0.7 M

8. áreas experimentais (detectores, câmaras etc.).....	US\$ 1 M
9. desenvolvimento.....	US\$ 2 M
TOTAL.....	US\$ 8.25M

4.2.2. Laboratório do Acelerador Linear - LAL/IFUSP

O LAL possui um acelerador linear de elétrons, pulsado, funcionando em uma faixa de energia de 6 a 70 MeV. A corrente média obtida é de 3 nA com o feixe direto $\left(\frac{\Delta E}{E} \approx 6\%\right)$ e 0,3 nA com feixe analisado em energia, com $\frac{\Delta E}{E} \approx 2\%$. A duração dos pulsos é de 1ns e a taxa de repetição 60 Hz, o que produz um fator de utilização (número de mérito) bastante baixo, de $\approx 10^{-4}$. Esse é um fator limitante quanto ao tipo de experimentos que podem ser realizados. O prédio mais o acelerador e equipamentos periféricos podem ser avaliados em US\$2.000.000.

As principais áreas de pesquisa estudadas no LAL são: espectroscopia nuclear por atividade residual, eletro e fotofissão utilizando detectores de traços e reações fotonucleares, por atividade residual ou pela detecção de nêutrons em linha. Os diversos grupos de pesquisa dividem uma única área experimental no prédio do acelerador.

O LAL dispõe também de uma sala de medidas onde são realizadas as contagens das amostras irradiadas. Essa sala dispõe de 8 detectores de fótons (5 HPGe e 3 GeLi), mesa automática para correlação angular Ge-Ge, eletrônica associada, sistema CAMAC e um computador PDP-11/84 que permite aquisição de dados de 4 experiências simultaneamente, além de aquisição biparamétrica evento a evento para as medidas de correlação angular e coincidência (valor aproximado: US\$500.000).

O LAL conta também com um laboratório de microondas, utilizado pelo grupo de desenvolvimento de aceleradores. Esse laboratório dispõe de geradores e medidores de frequência, medidores de potência, osciladores e equipamentos associados (valor aproximado: US\$200.000).

O laboratório utiliza os serviços das oficinas eletrônica e mecânica, contando também com um corpo próprio de 10 técnicos em período integral. Quatro desses técnicos dedicam-se ao desenvolvimento do microtron (2 de nível superior, 2 de nível médio), dois (de nível médio) são dedicados à operação do acelerador e quatro se dividem entre a manutenção do linear e o desenvolvimento do microtron (2 de nível superior e 2 de nível médio).

Pessoal científico: o laboratório conta com 12 doutores e 3 mestres. Dos doutores, 10 são experimentais, 1 teórico e 1 trabalha com computação, desenvolvendo os sistemas de aquisição e análise de dados do laboratório. Os 3 mestres são experimentais, sendo que dois trabalham na área de desenvolvimento de aceleradores.

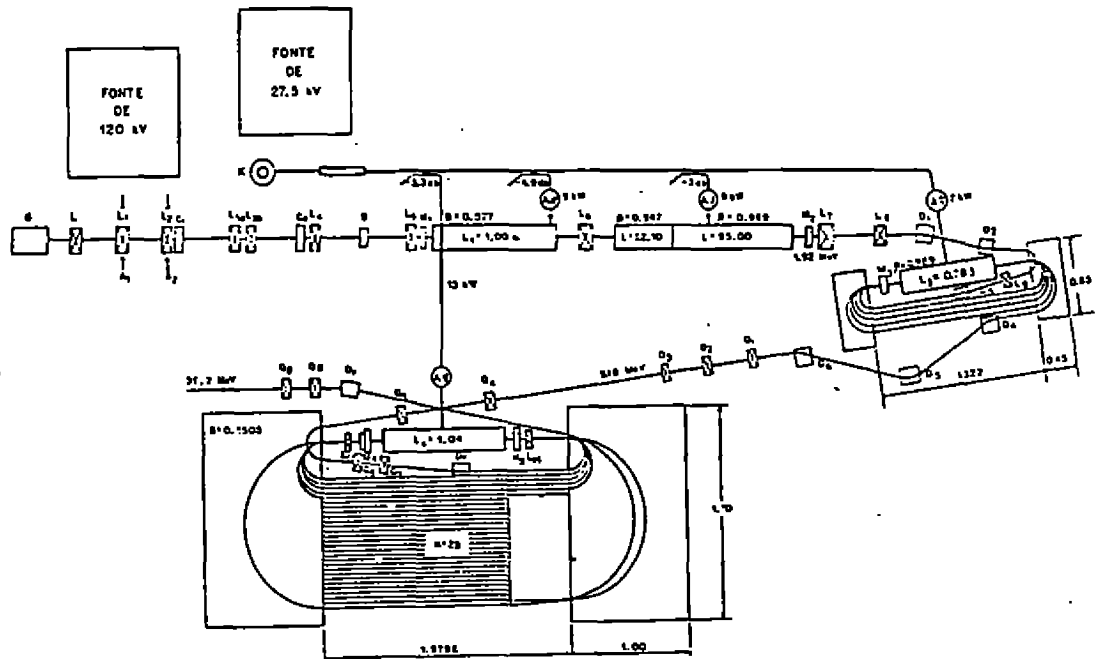
Devido às limitações do atual acelerador linear o LAL vem desenvolvendo o projeto de um novo acelerador de elétrons, com fator de utilização de 100%, que permita a realização de experiências de coincidência. O acelerador projetado,

atualmente em construção, consiste em um microtron (acelerador linear recirculado) com energia final de 30 MeV. A figura 17 mostra um diagrama do acelerador.

O acelerador é constituído de seis sistemas: injeção, aceleração, microondas, controle, vácuo e refrigeração, que ser, o descritos em maiores detalhes a seguir. Deve-se enfatizar, no entanto, que apenas o sistema de microondas e parte (pequena) dos sistemas de vácuo e controle serão importados. As cavidades aceleradoras, o canhão de elétrons, todo o sistema de transporte e monitoração do feixe, os eletroímãs e suas fontes e as bombas de vácuo iônicas e suas fontes serão construídos no laboratório ou adquiridos no mercado nacional.

O sistema de injeção é constituído de um canhão de elétrons que fornecerá um feixe de elétrons de 100 keV e 2mA de corrente contínua e do sistema de transporte constituído de lentes magnéticas, "chopper" (picotador do feixe), "buncher" (agrupador) e "viewscreen".

Fig.17 Diagrama do Acelerador Microtron de 30 MeV, em construção no Laboratório do Acelerador Linear da USP.



O sistema de aceleração é constituído de 3 subsistemas. O primeiro é constituído de 2 estruturas aceleradoras (seção de captura e seção pré-aceleradora) com 1,0 m e 1,47 m de comprimento que elevarão a energia do feixe de elétrons de 100 keV a 1,99 MeV. O segundo subsistema, chamado de microtron "booster", elevará a energia de 1,93 MeV a 4,4 MeV e é constituído de uma estrutura aceleradora de 1,02 m de comprimento e dois eletroímãs dipolares de 1800 colocados nas extremidades. Os dois eletroímãs farão com que o feixe de elétrons possa ser recirculado 3 vezes na estrutura e consequentemente acelerado 3 vezes. A energia ganha por volta é 0,83 MeV e a intensidade do campo magnético dos eletroímãs 0,1385 T. O tamanho dos eletroímãs é 20x40 cm e cada um pesará 120 kg. O terceiro subsistema chamado de microtron principal elevará a energia do feixe de elétrons de 4,4 MeV a 30 MeV através de uma estrutura aceleradora de 1,04 m de comprimento e 2 eletroímãs dipolares de 1800 com intensidade de campo magnético 0,1505 T. Neste subsistema o feixe de elétrons recirculará 29 vezes. A energia ganha por volta é 0,89 MeV e o tamanho dos eletroímãs é 1,0x1,70 m² e cada um pesará 2 ton.

O sistema de microondas é responsável pela geração e distribuição da potência de microondas às 4 estruturas aceleradoras e ao sistema "chopper e buncher". O sistema é constituído de uma fonte de microondas de 50 kW em onda contínua e rede de microondas (guias de onda, divisores, acopladores etc.).

O sistema de controle é responsável pelo monitoramento e controle dos vários sistemas. O sistema de controle será automático e os vários sistemas serão interfaceados ao computador central através do sistema CAMAC.

O sistema de vácuo é constituído de bombas de vácuo, válvulas e monitores de vácuo. Deverá produzir vácuo da ordem de 10⁻⁸ torr e terá 10 bombas iônicas de 400 l/s que serão construídas no laboratório.

O sistema de refrigeração deverá ser capaz de absorver toda a potência de microondas dissipada nas estruturas aceleradoras e rede de microondas e a potência dissipada nos eletroímãs, lentes magnéticas e colimadores, aproximadamente 120 kW no total.

As características gerais do acelerador estão resumidas na tabela 4.2.2.

Tabela 4.2.2. Características do Acelerador Microtron

1. Características Gerais:

Dimensão (m)	9x5
Frequência (MHz)	2,450
Energia máxima (MeV)	30,2
Intensidade do feixe (μA)	100
Emitância (π mm-mrad)	<0,17
Número de klystrons	(50 kW) 01

2. Sistema do Canhão de Elétrons:

Energia de saída (keV)	100 ± 0,1%
Intensidade do feixe de elétrons (mA)	2
Dimensão do feixe (diâmetro (mm))	1
Emitância (π mm-mrad)	0,9

3. Sistema do Acelerador Injetor:

Energia de saída (MeV)	1,92
Intensidade de corrente (μ A)	120
Número de estruturas aceleradoras	2
Potência de R.F. (kW)	18(9 ± 9)

4. Microtron "Booster":

Energia de saída (MeV)	4,45
Intensidade de corrente (μ A)	100
Energia ganha por volta (MeV)	0,83
Número de voltas	03
Comprimento do acelerador (m)	1,027
Potência de R.F. (kW)	9
Intensidade do campo magnético (T)	0,1385
Dimensão do eletroímã (cmxcm)	20x40
Distância entre os eletroímãs (m)	1,517
Peso do eletroímã (kg)	120
Raio da 1ª órbita (cm)	5,52
Raio da 3ª órbita (cm)	11,62

5. Microtron Principal:

Energia de saída (MeV)	30,2
Intensidade de corrente (μ A)	100
Energia ganha por volta (MeV)	0,89
Número de voltas	29
Comprimento do acelerador (m)	1,04
Potência de R.F. (kW)	12
Intensidade do campo magnético (T)	0,1505
Dimensão do eletroímã (mxm)	1,0x1,70
Distância entre os eletroímãs (m)	1,9796
Peso dos eletroímãs (ton)	02
Raio da 1ª órbita (cm)	10,54
Raio da 29ª órbita (cm)	67,63

Todos os cálculos dos componentes do acelerador e a simulação do transporte do feixe de elétrons foram feitos com os seguintes programas de computação, implantados no laboratório: Hermansfeldt, Transport, Parmela, Trim, Poisson, Superfish e Ptrace.

O laboratório já tem infraestrutura para construir as quatro estruturas aceleradoras. Estas são constituídas de cavidades ressonantes convenientemente acopladas, lateralmente. Devido ao acoplamento lateral essas cavidades são chamadas de "side-coupled" e foram desenvolvidas em Los Alamos (LANL). O grupo de física de aceleradores já tem tecnologia na construção do canhão de elétrons, lentes magnéticas, quadropolos, bombas de vácuo tipo iônicas e eletroímãs, adquirida na montagem e melhoramento do Acelerador Linear de Elétrons existente no laboratório. grupo tem também experiência na metalização de cerâmica de alumina e solda brasagem, tecnologias pouco conhecidas no país.

ORÇAMENTO (em US\$)

Sistema do canhão de elétrons	22.000
Sistema de aceleração	55.000
Sistema de microondas	237.000
Componentes de microondas	90.000
Sistema de transporte	71.000
Sistema magnético	40.000
Sistema de vácuo	65.000
Sistema de refrigeração	25.000
Sistema de controle	53.000
Infraestrutura	<u>80.000</u>
TOTAL	738.000

Financiamento (já aprovado): BID (34%), FAPESP (32%), USP (22%), FINEP (9%), MCT (3%). (Os valores acima não incluem salários).

Início de funcionamento estimado: 1992.

Além do acelerador microtron o laboratório desenvolve o projeto de uma marcador de fótons ("photon tagger").

O sistema usado para marcação de fótons é conceitualmente simples e está esquematizado na figura 18. O sinal produzido por um detector que examina uma das partículas envolvidas no processo de fotoprodução, em coincidência com o sinal do detector de elétrons disparado pelo elétron que originou o fóton, permite a determinação da energia do fóton produzido.

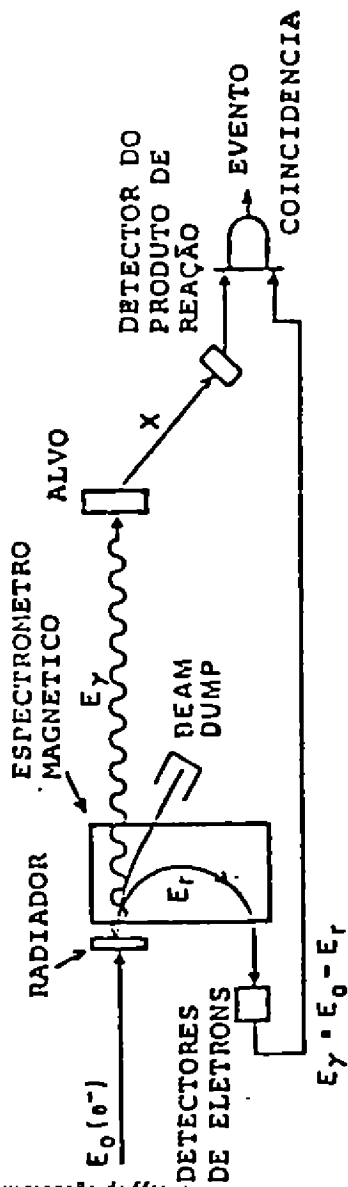


Fig. 18. Sistema usado para marcação de fótons.

Esse sistema exige a construção de um espectrômetro de elétrons de boa resolução (tipicamente $\left(\frac{\Delta E}{E}\right) \approx 10^{-3}$) e grande necessidade de momento $\frac{P_{\text{máx}}}{P_{\text{atn}}} \approx 2$ para que se possa estudar uma boa faixa de energias de excitação simultaneamente. O plano focal do espectrômetro deve ser instrumentalizado com detectores sensíveis à

posição (cintiladores plásticos com fotomultiplicadoras) e eletrônica associada bastante rápida, permitindo resolução temporal da ordem de alguns nano-segundos.

4.2.3. Laboratório de física nuclear com partículas pesadas do departamento de física experimental do IFUSP

O grupo desenvolve um programa de estudos em Física Nuclear experimental e em instrumentação que aborda:

- (i) mecanismos de reações nucleares com partículas carregadas (íons "leves" e íons "pesados");
- (ii) estrutura nuclear, através de espectroscopia nuclear com partículas e radiação gama;
- (iii) instrumentação e métodos "nucleares" visando o aprimoramento das condições experimentais existentes e o desenvolvimento de equipamento e métodos para aplicações em outras áreas.

Os estudos experimentais sobre Física Nuclear são realizados a partir de reações nucleares provocadas por feixes de íons, produzidos pelo acelerador Pelletron do IFUSP. Para essas medidas, o grupo dispõe de dois equipamentos de grande porte acoplados a linhas de feixe: um espectrógrafo magnético e uma câmara de reações refrigerada. Conta, também, o grupo com programas de colaboração com os Laboratório Tandem, em Buenos Aires, com a Universidade de Pittsburgh e com os Laboratórios Nacionais de Brookhaven e de Oak Ridge (EUA).

Um esforço continuado tem sido feito no desenvolvimento instrumental. Um grande sucesso foi obtido no desenvolvimento de detectores à gás sensíveis à posição para aplicação em Física Nuclear e outras áreas. Também encontra-se em desenvolvimento um espectrômetro de tempo de voo com um enorme potencial de aplicação em análises químicas de superfície e determinação de massas de macromoléculas.

Para os trabalhos de desenvolvimento e análise, conta-se com laboratórios que ocupam uma área total de 100m no Departamento de Física Experimental, onde se encontram os equipamentos essenciais para a realização de testes e medidas, tais como sistema de alto vácuo com câmara de testes, sistema simples de aquisição de dados, microcomputadores, microscópios ópticos etc.. Um técnico de nível superior supervisiona as atividades de dois técnicos de nível médio na manutenção e desenvolvimento dos equipamentos. Técnicos microscopistas realizam tarefas de rotina na leitura de emulsões nucleares, ainda utilizadas em alguns estudos.

Do ponto de vista científico, o prosseguimento dos projetos de pesquisa em andamento poderá fornecer informações substanciais sobre os mecanismos de interação entre "íons pesados leves" e sobre a excitação do núcleo-projétil e do núcleo-alvo nessas interações. Os estudos de carácter espectroscópico sobre estrutura nuclear realizados

com partículas leves ou íons pesados (especialmente aqueles envolvendo sistemas de alta excitação e dotados de momentos angulares elevados) prometem indicar características importantes da dinâmica nuclear. Vários trabalhos sobre estes temas foram publicados recentemente por este grupo.

Pretende-se para o futuro próximo, além de dar continuidade aos programas de pesquisa em andamento, atacar os seguintes projetos:

(i) desenvolvimento de sistemas de detecção e identificação de íons de massas intermediárias para o espectrógrafo magnético do grupo em São Paulo e para o espectrógrafo de Buenos Aires;

(ii) estudos de reações centrais e reações periféricas com íons pesados relativísticos em cooperação com o Laboratório Nacional de Brookhaven. Contempla-se também a produção e utilização de feixes secundários através da fragmentação de íons relativísticos. Parte da instrumentação necessária para estes projetos será desenvolvida e construída em São Paulo nos laboratórios próprios do grupo.

Estima-se que para levar a cabo este programa de pesquisa será necessário um investimento de US\$ 250.000/ano para os próximos três anos.

4.3. Considerações Acerca de Novas Instalações

Os primeiros aceleradores dedicados à pesquisa em física nuclear básica foram instalados em São Paulo, no então Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, durante a década de 50, tendo estado em operação por um período de cerca de 15 anos. Estes foram um acelerador tipo Van de Graaff para partículas leves (prótons, dêuterons, alfas) com 4 MeV de tensão máxima no terminal e um Betatron Allis-Chalmers capaz de produzir feixes de radiação g de freimanto (bremsstrahlung) com energia máxima de 24 MeV. Tais equipamentos cobriam, na época, uma fração muito mais importante das áreas ativas de pesquisa em física nuclear básica frente à coberta por instalações existentes no exterior que atualmente, sobretudo tendo em conta a atual importância crescente de projetos experimentais envolvendo hádrons acelerados a energias relativísticas e medidas não inclusivas de processos induzidos por léptons com valores grandes de energia e momento transferidos. De fato, mesmo no âmbito internacional, tal deslocamento de interesses em termos de pesquisa com o conseqüente aumento em porte do equipamento necessário, levou ao fechamento de um grande número de instalações experimentais menores, e à conseqüente concentração de esforços envolvendo projéteis mais energéticos e feixes contínuos de elétrons de alta energia em alguns grandes laboratórios especializados, abertos a usuários externos.

Paralelamente ao crescimento em porte e ao conseqüente processo internacional de condensação de esforços na instalação e operação de aceleradores na área de Física

Nuclear, pode ser constatado um crescimento também em porte mas sobretudo em complexidade dos equipamentos experimentais periféricos. O desenvolvimento e construção de tais equipamentos envolve também um esforço científico e técnico intenso, e é freqüentemente conduzido em instituições afastadas dos aceleradores em que se dará a sua efetiva utilização final.

Dentro desse quadro, é importante formular diretrizes gerais que orientem os investimentos, no país, ligados à pesquisa básica na área de Física Nuclear. Dado o grau de maturidade atingido tanto pela pesquisa experimental quanto teórica, um ponto preliminar e que deve ser tomado como absolutamente decisivo para a implementação de projetos novos é a sua competitividade internacional em termos científicos. Por isso deve-se entender que os projetos a serem apoiados deverão, se inserir de forma não redundante no cenário geral das fronteiras, tanto internas quanto externas, da física nuclear atual. Em particular, deve ser evitado o dispêndio de esforços e recursos na duplicação, com atraso, de instalações atualmente já disponíveis em nível internacional. Tais esforços e recursos deverão, em tais circunstâncias, ser prioritariamente destinados à utilização, a ser conseguida em bases competitivas, das instalações já disponíveis e a um programa complementar e paralelo de desenvolvimento, no país, de instrumentação periférica, a exemplo do que se observa em países europeus, incluindo Portugal e Espanha. Tal posição não deve ser tomada, por outro lado, como propondo um congelamento na implementação de projetos envolvendo novas instalações dedicadas à pesquisa em física nuclear. Tal decisão seria de fato extremamente nefasta, por exemplo, para a mobilização e renovação de recursos humanos, sobretudo em áreas de desenvolvimento tecnológico fundamentais para o país, como é por exemplo a física de aceleradores. O que se deve evitar absolutamente é uma situação análoga, em programas científicos, à encorajada, na área industrial, através das conseqüências nefastas do isolamento criado por reservas de mercado.

É importante, em seguida, avaliar o papel a ser projetado, durante os próximos dez anos, para os laboratórios dedicados à física nuclear atualmente existentes no país, bem como para suas expansões ou multiplicação, tanto aquelas já parcialmente financiadas e em construção como as que se encontram em estágios mais preliminares de implementação. Esse papel tem pelo menos três faces distintas. A primeira se refere à exploração continuada de linhas de trabalho competitivas bem desenvolvidas no país, ligadas sobretudo às fronteiras internas da área. A segunda face se refere à função insubstituível dos laboratórios em programas de formação pessoal técnico e científico. Finalmente, a terceira face se refere à manutenção de um contacto objetivo, dentro do contexto do país, com as questões e problemas da física de aceleradores. A capacidade tecnológica daí resultante, além de conseqüências fora do âmbito da pesquisa básica, será um ingrediente extremamente valioso para o desenvolvimento e construção de equipamento competitivo mais complexo e, em particular, de periféricos a serem utilizados em laboratórios internacionais.

5. PRIORIDADES RECOMENDADAS PARA A FÍSICA NUCLEAR

Neste capítulo são apresentadas recomendações relativas à pesquisa teórica e experimental na área de Física Nuclear básica, no país, durante a década de 90.

As recomendações feitas dizem respeito, por um lado, ao apoio necessário por parte das instituições em que tal pesquisa é desenvolvida e dos órgãos governamentais de fomento e, por outro, ao direcionamento de esforços e projetos concomitantemente desejável por parte dos membros da comunidade científica, ativos nessas instituições, cuja atividade diga respeito à área de Física Nuclear. Juntamente com as recomendações e sua justificação, são apresentados dados relativos aos seus reflexos em termos financeiros. Para facilidade de referência, estes dados vêm ainda resumidos na seção 5.2. Nos números apresentados não estão incluídos recursos orçamentários das instituições referentes a despesas com pagamento de pessoal.

5.1. Recomendações Relativas à Pesquisa em Física Nuclear Básica

A física nuclear básica, como de resto todas as outras áreas de pesquisa básica no Brasil, é financiada essencialmente com recursos de órgãos governamentais de fomento, seja na área federal, seja em áreas estaduais, além de recursos orçamentários das instituições em que ela se desenvolve (Universidades, Institutos, Fundações etc.). Estes últimos se referem quase exclusivamente a despesas com pagamento de pessoal. Por ser menos dependente de investimentos específicos relativamente volumosos em termos não só financeiros mas também de recursos humanos, a pesquisa teórica tem atualmente uma distribuição geográfica menos concentrada que a pesquisa experimental. Esta, em virtude das mesmas circunstâncias, mostra uma tendência clara ao subdimensionamento, no caso da Física Nuclear (apenas 50% dos doutores ativos nas várias instituições de pesquisa se dedicam ao trabalho experimental; v. tabela 4.1.1., p.25), e atualmente está concentrada em São Paulo, em torno dos laboratórios do Acelerador Linear e do Pelletron, ambos na Universidade de São Paulo. Esses dois laboratórios, cujas instalações atuais estão descritas nas seções 4.2.1 e 4.2.2) têm presentemente projetos já parcialmente financiados de expansão (v. Tabelas 5.1 e 5.2).

Tabela 5.1. Custos e prazos para o projeto de expansão do Acelerador Pelletron. Os custos são expressos em unidades de US\$10⁶.

1ª Etapa - 13 cavidades ressonantes. Prazo: 30 meses (a partir de 01/01/90)			
Ítem	Custo Estimado	Financiamento Aprovado	Fonte
Cavidades supercondutoras	1,1	1,1	BID
Sistema de refrigeração	0,55	0,55	FAPESP
Criostatos+Sistemas e Eletrônica de RF	1,5	1,5 ^(*)	FINEP
Prédio	4,5	0,4	BID
Atualização do sistema de aquisição de dados	0,1	0,1	FAPESP
Instalação	1,0	-	-
Periféricos (linhas de feixe e câmaras de espaçamento)	0,7	-	-
Detetores (gás, semicondutores)	0,7	{0,1 ^(*) 0,1 ^(*) }	FAPESP
T O T A L	10,65	5,05	

(*) Pedido em tramitação em Janeiro de 1990.

2ª Etapa - 20 cavidades ressonantes. Prazo: 40 meses (após conclusão da 1ª fase)	
Ítem	Custo Estimado
Cavidades supercondutoras	3,2
Criostatos	0,6
Criostato para ensaio	0,1
Dowar de 1000ℓ	0,1
Ampliação do sistema de distribuição de LN ₂ e LHe	0,25
Eletrônica	0,3
Linhas de feixe	0,7
Periféricos e detetores	1,0
Desenvolvimento	2,0
T O T A L	8,25

Tabela 5.2. Projeto Microtron

I. Máquina de 30 MeV

Custo total (estimado) em US\$10 ⁸	0,75	
Recursos aprovados (em %)		
	BID	34%
	FAPESP	32%
	USP	22%
	FINEP	9%
	MCT	3%
T O T A L	100%	
Prazo para construção e instalação: 24 meses		
Sistema de marcação de fótons	0,25	
Recursos aprovados	-	

II. Máquina de 300 MeV

Item	Custo estimado (US\$10 ⁸)	
5 klystrons	0,5	
4 fontes para klystrons	0,3	
2 ímãs recirculadores (2x10ton)	0,1	
Fonte dos ímãs	0,1	
Cobre+soldas para cavidades	0,1	
Bombas de vácuo	0,3	
Transporte	0,3	
Controle	0,3	
T O T A L (Máquina)	2,1	
Prédio (total estimado, inclusive blindagem; área = 2000 m ²		5,0
<u>Instrumentação</u>		
Espectrômetro	1,0	
Marcador de fótons	1,0	
Detectores+eletrônica+aquisição de dados	0,9	
T O T A L G E R A L	10,0	

Tais projetos visam a uma atualização realística dos recursos experimentais disponíveis nas linhas de trabalho que vêm sendo neles desenvolvidas desde a década de 50: o estudo de propriedades nucleares com projéteis eletromagnéticos (elétrons e fótons) e o estudo de reações e estrutura nuclear através de colisões hadrônicas (nucleons ou partículas mais pesadas como projéteis). Esses dois centros têm funcionado consistentemente como os focos mais importantes de formação de físicos nucleares experimentais no país, vários dos quais têm inclusive reforçado a pesquisa experimental em outras áreas (notadamente Física Atômica e utilização de técnicas nucleares para caracterização de materiais) através do redirecionamento de sua linha de trabalho.

Recomendação 1 - A fim de assegurar a continuidade da existência e desenvolvimento dessas linhas tradicionais de trabalho e de formação de pessoal no país, é essencial que a continuidade e regularidade do apoio aos projetos já iniciados de expansão de laboratórios existentes seja assegurado, de forma a viabilizá-los dentro dos prazos adequados e previstos.

Existe, no entanto, uma capacitação gerada para pesquisa experimental em física nuclear no país, em particular na área do estado do Rio de Janeiro, que vem sofrendo de um processo de inibição decorrente da falta de uma política nacional que promova sua plena utilização, garantindo a existência e sobretudo a operacionalidade adequada de facilidades experimentais. Esta situação vem provocando, em particular, uma tendência marcante ao "inbreeding" nos centros mais bem equipados, de todo inconveniente para a vitalidade da área. Os laboratórios atualmente existentes na Universidade de São Paulo não contam com uma infra-estrutura suficiente para permitir a sua utilização regular e suficientemente programável por pesquisadores de outras instituições. As deficiências mais críticas ocorrem no referente a periféricos (falta de recursos) e na infra-estrutura de apoio técnico e de manutenção (pela defasagem salarial crônica com o mercado de trabalho nacional para elementos suficientemente qualificados e por incertezas e irregularidades no fluxo de recursos que impossibilitam uma programação e implementação adequada de atividades de manutenção e desenvolvimento do equipamento de uso comum).

Como reverso desta questão, as dificuldades que grupos externos aos laboratórios encontram em utilizá-los tendem a diminuir a sua disposição ou capacidade para utilização de laboratórios no exterior que disponham de facilidades não existentes no país. Nesse sentido, a operacionalidade dos laboratórios brasileiros, no sentido aludido, tenderia a impulsionar de forma importante a viabilidade e o alcance de aberturas externas, em bases sistemáticas.

Recomendação 2 - É indispensável garantir volume e regularidade suficiente de recursos para que os laboratórios brasileiros possam ser utilizados de forma mais intensiva e

eficiente, sobretudo por usuários externos. Recursos para manutenção e desenvolvimento de equipamento de uso comum devem, em todos os casos, ser considerados como parte integrante do custo dos laboratórios. Tais recursos montam, tipicamente, em 20% do investimento de capital ao ano.

Uma estimativa do montante de recursos envolvidos na recomendação 2 se encontra na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Investimento de capital (IC) e recursos necessários anualmente para manutenção e desenvolvimento de equipamento de uso comum (PID/ano). Valores em US\$10⁶.

Laboratório	1990-1992	1992-1996	1996 →
Pelletron+Linac	IC = 8,0 PID/ano = 1,6	IC = 18,0 PID/ano = 3,6	IC = 24 PID/ano = 4,8
Linear+Microtron	IC = 2,7 PID/ano = 0,54	IC = 3,7 ^(*) PID/ano = 0,74	IC = 10 PID/ano = 2,0

(*) Com a desativação do atual Acelerador Linear.

Projetos envolvendo a instalação de facilidades experimentais adicionais na área de física nuclear no país devem evidentemente atender ao duplo requisito de viabilidade (em termos não só financeiros mas de efetiva disponibilidade de recursos humanos e técnicos) e do interesse científico, dentro do panorama internacional da área (vide seção 4.3). Limitações quanto ao primeiro requisito serão, de forma mais imediata e eficiente, contornadas através de uma política nacional de apoio a projetos brasileiros envolvendo a utilização de facilidades experimentais já existentes e operacionais no exterior, a exemplo do que deverá ocorrer na área de pesquisa experimental da Física das Partículas Elementares. Para isso, os laboratórios existentes no país deverão funcionar como centros de formação de pessoal qualificado.

Recomendação 3 - No sentido de complementar os recursos oferecidos pelas facilidades experimentais instaladas no país, deve ser instituída uma política nacional de apoio a projetos brasileiros envolvendo a utilização de instalações experimentais no exterior. Tal política, em particular, permitirá uma expansão considerável das linhas experimentais existentes, independentemente de atrasos e redundâncias inerentes à duplicação, no país, de recursos correntemente disponíveis.

Uma estimativa do montante de recursos envolvidos na recomendação 3 é dada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Recursos de intercâmbio para apoio a projetos brasileiros envolvendo a utilização de instalações experimentais no exterior. Os valores citados correspondem a

despesas de deslocamento e estadia apenas. Recursos ligados ao desenvolvimento de equipamento periférico estão incluídos na tabela 5.5, referente a recomendação 6 abaixo.

Custo médio por projeto US\$30.000,00

Ano	Número Estimado de projetos	Total US\$
1990-1992	03	90.000,00
1992-1995	06	180.000,00
1995-2000	12	360.000,00

Recomendação 4a - Recomenda-se à comunidade de Física Nuclear que proceda a um estudo de viabilidade de implementar no país um acelerador de íons pesados leves com alta corrente e baixas energias, destinado prioritariamente à medida de seções de choque de fusão abaixo da barreira coulombiana, de interesse astrofísico. Em princípio, tal projeto atenderia aos requisitos mencionados de escala financeira, disponibilidade de recursos humanos e interesse científico, e poderá eficientemente aglutinar a capacidade experimental existente mas atualmente inibida por falta de instalações de trabalho adequadas.

Recomendação 4b - Recomenda-se à comunidade de Física Nuclear que proceda a um estudo de viabilidade para a inclusão de um sistema de retroespalhamento de fótons utilizando o futuro feixe de elétrons do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). O objetivo do sistema seria a produção de fótons monocromáticos polarizados na faixa de centenas de MeV, a serem utilizados em experiências de fotoexcitação nuclear. Deverão ser levados em conta, em particular, os prazos previsíveis para a disponibilidade do feixe de elétrons do LNLS, a existência de tais sistemas em Frascati (Ladon e Taladon) e Brookhaven (Legs) bem como o projeto GRAAL de Grenoble, cuja data prevista de conclusão é 1995.

Os estudos de viabilidade recomendados acima teriam uma duração típica de 1 ano e consumiriam recursos da ordem de US\$30.000,00 cada um deles. Tais recursos cobririam inclusive custos de visitas aos laboratórios análogos no exterior para consultas e contactos técnicos.

Outro fator limitante da utilização dos laboratórios existentes por grupos externos tem sido a dificuldade de assegurar recursos de intercâmbio para apoiar atividades de grupos fora de suas instituições de origem. Essa limitação existe ainda não só com relação à pesquisa experimental, mas se faz sentir também na área da pesquisa teórica, e se tornará mais aguda à medida que os laboratórios consigam implementar infra-estruturas compatíveis com a sua utilização ampla em termos regulares. Esta, por outro

lado, dará ensejo à descentralização no desenvolvimento de equipamento experimental periférico, que poderá e deverá ocorrer nas instituições de origem dos usuários externos.

Recomendação 5 - Paralelamente à regularidade de recursos para manutenção e desenvolvimento de infra-estrutura de uso comum dos laboratórios, deve-se garantir recursos suficientes para o intercâmbio envolvido em sua efetiva utilização por usuários externos. Este intercâmbio inclui também aquele decorrente de programas teóricos ligados às atividades dos laboratórios.

Recomendação 6 - Para o reforço das atividades experimentais no maior número de instituições e para a plena e eficiente utilização dos aceleradores é importante garantir o apoio a laboratórios de desenvolvimento e construção de equipamento periférico nas instituições de origem dos usuários externos.

Uma estimativa do montante de recursos envolvidos na recomendações 5 e 6 se encontra na tabela 5.5.

Tabela 5.5. A. Recursos para intercâmbio associado à utilização dos laboratórios nacionais por usuários de outras instituições

Custo anual por usuário externo.....	US\$ 1.000,00
Número médio estimado de usuários externos ^(*)	30
TOTAL	US\$30.000,00

^(*)Inclusive intercâmbio teórico de apoio

B. Estimativa do custo do apoio a laboratórios de desenvolvimento e construção de equipamento periférico para a utilização em outros laboratórios

Custo anual por usuário externo	US\$30.000,00
Usuários:	
USP	34
Não USP	29
TOTAL	63 custo total US\$1,89x10⁶

Para a plena eficiente utilização da estrutura contemplada nas recomendações anteriores é de fundamental importância a existência de esquemas regulares, no âmbito das instituições de ensino, para um eficiente recrutamento e formação de novos pesquisadores. Para isso é importante promover um processo rápido de modernização

curricular associado a programas de iniciação científica e formação de pós-graduação com base em um esquema competitivo de bolsas de estudo. Tais programas deverão necessariamente contemplar tanto o setor técnico como o de pesquisa científica. Neste último setor é importante priorizar a formação de pessoal dedicado à pesquisa experimental, cujo número é atualmente ainda relativamente insuficiente.

Recomendação 7 - Recomenda-se aos membros da comunidade de Física Nuclear vinculados a instituições de ensino que promovam as reformulações curriculares indispensáveis, zelando ao mesmo tempo por sua efetiva implementação e complementando-as com programas adequados de iniciação científica. No nível pós-graduado, devem ser enfatizados programas de doutoramento e desenfaturados os de mestrado, e encorajados também programas de desenvolvimento da utilização de técnicas nucleares.

5.2. Resumo dos Recursos Recomendados para a Área de Física Nuclear Básica

Os valores citados são em US\$10⁶.

Recomendação 1 - Apoio a projetos iniciados de expansão de laboratórios existentes, com aceleradores.

Custo:	1990-92	11,4
	1992-96	18,25

Recomendação 2 - Recursos para manutenção e desenvolvimento de equipamento de uso comum dos laboratórios existentes com aceleradores e suas expansões.

Custo:	1990-92	1,72/ano
	1992-96	3,80/ano
	1996-00	6,80/ano

Recomendação 3 - Apoio a projetos brasileiros no exterior.

Custo:	1990-92	0,09
	1992-95	0,18
	1995-00	0,36

(*) Valores referentes a despesas de deslocamento e estadia apenas.

Outros custos incluídos nas recomendações 5 e 6.

Recomendações 4a e 4b - Estudos de viabilidade.

Custo:	2 x 0,03 =	0,06
--------	------------	------

Recomendações 5 e 6 - Intercâmbio e recursos para desenvolvimento e construção de equipamento periférico por usuários externos.

Custo: $0,03 + 1,89/\text{ano} = 1,92/\text{ano}$

FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS

1.A FÍSICA DAS PARTÍCULAS ELEMENTARES

A Física das Partículas tem por objetivo a descoberta dos constituintes fundamentais da matéria, e a identificação das forças com que eles interagem. Busca-se formar um quadro básico de leis e princípios que possibilitem a descrição dos fatos conhecidos e a previsão de novos fenômenos.

Sendo a parte mais fundamental da Física, responsável pela descrição das propriedades fundamentais da matéria, do espaço, da energia, e das entidades e estruturas matemáticas em termos das quais as interações são descritas, a Física das Partículas e dos Campos faz uso de instrumental matemático sofisticado, cria novos conceitos (como o do vácuo fervilhante de processos físicos em teoria quântica dos campos), desenvolve tecnologia específica para as investigações experimentais necessárias (como a dos grandes aceleradores de partículas).

As ambições na busca das estruturas fundamentais e dos princípios unificadores levam as teorias, nesta área da Física, a esforços de imaginação e de extrapolação que lhe são muito peculiares, utilizando-se ao máximo do poder de criação do cientista. O esforço de criatividade teórica estimula a contrapartida da experimentação imaginativa, objetiva e competente para o teste de conceitos e modelos. Por outro lado, os novos fenômenos observados experimentalmente exigem a interpretação racional e simples oferecida por teorias consistentes, e que frequentemente desafiam a imaginação e exigem capacidade de cálculo além das fronteiras estabelecidas. A Física das Partículas Elementares e dos Campos se desenvolve como resultado desse desafio permanente entre teorias e experimentos. Como em toda a Física, é a Natureza, e portanto o experimento, que determina onde está a Verdade; a mente humana organiza os fatos e cria as linguagens adequadas para descreve-los de modo racional.

Por definição, uma partícula elementar não possui estrutura interna, não podendo portanto ser descrita em termos de constituintes mais simples. É claro então que o quadro de partículas consideradas como elementares evoluiu ao longo do tempo. No início desse século descobriu-se que os átomos possuem um núcleo, formado por prótons e nêutrons, em torno do qual movem-se elétrons. Os prótons e nêutrons foram considerados como elementares durante cerca de 50 anos, e somente há cerca de 20 anos descobriu-se neles uma estrutura interna que pode ser descrita em termos de partículas constituintes, inicialmente chamadas pártons, e que logo foram identificadas com os quarks de um modelo teórico criado anteriormente para a classificação dos hádrons. Por outro lado, o elétron, descoberto no final do século passado, não apresentou ainda

qualquer indício de possuir uma estrutura interna, e é portanto considerado uma partícula elementar.

O conceito de partícula elementar está obviamente relacionado com as pequenas dimensões que devem ter esses objetos. A penetração em estruturas mais internas da matéria deslocou a experimentação dos 10^{-8} cm típicos dos raios atômicos para os 10^{-12} cm dos raios nucleares, para os 10^{-13} cm dos raios dos prótons, e para os 10^{-15} cm em que os quarks se revelam como constituintes dos prótons e nêutrons. A investigação dessas dimensões ínfimas exige que os projéteis lançados sobre essas estruturas possuam energias elevadas, a fim de que seus correspondentes comprimentos de onda de Broglie possam ser menores do que as dimensões a analisar. É assim que se passou dos 20 eV dos elétrons que investigaram a estrutura atômica no experimento de Franck e Hertz em 1914 para os 400 MeV dos estudos sobre a estrutura nuclear por Hofstadter em 1950, e para os 5.000 MeV que revelaram a estrutura dos prótons em Stanford em 1969, e para os 400.000 MeV que esclareceram a estrutura das interações fracas em 1983.

Esse programa de investigação de estruturas elementares está portanto essencialmente associado ao desenvolvimento de técnicas de aceleração de partículas a altíssimas energias, o que explica porque esta área da física tem o nome alternativo de Física de Altas Energias, e dá às atividades de pesquisa nela desenvolvidas características peculiares: concentração de atividade experimental em grandes laboratórios, nos quais estão os aceleradores de partículas, com intensa cooperação internacional e inter-institucional.

1.1. Partículas Elementares: Quarks

A matéria é formada por átomos, que se agregam, mediante forças eletromagnéticas, formando moléculas, cristais ou redes metálicas. Os átomos possuem núcleos de carga positiva, constituídos de prótons e nêutrons, os quais são mantidos unidos por forças muito intensas e de curto alcance, originadas na chamada interação forte, a qual constitui uma das estruturas dinâmicas fundamentais da natureza.

As interações fortes que mantêm os prótons e nêutrons (em conjunto denominados nucleons) confinados em uma região muito pequena (raios da ordem de 10^{-12} cm), formando os núcleos, foram durante cerca de 30 anos atribuídas a campos intermediários cujos quanta são os mésons π , descobertos experimentalmente em 1947. Os nucleons e os píons são chamados hádrons, nome que significa que eles são agentes

das interações fortes, e sensíveis a elas. O isospin (spin isotópico) foi identificado como um atributo interno dessas partículas, que participa na descrição de suas interações, através da chamada simetria SU (2).

Os elétrons, os nucleons, e os campos de força das interações eletromagnéticas (representados pelos seus quanta, os fótons) e das interações fortes (representados pelos píons) são necessários e suficientes para constituir e explicar a matéria como observada em fenômenos da vida corrente. Violando a auto-suficiência deste pequeno número de hádrons, apareceram no final da década de 1940 e durante a década de 1950, muitas partículas novas, chamadas estranhas, as quais também são hadrônicas, isto é, também sofrem interações fortes. Essas partículas possuem um atributo intrínseco, não observado antes, ao qual se chamou estranheza. Algumas delas são partículas de spin zero, como os píons, e são chamadas káons; outras possuem spin $1/2$, como os nucleons, e são chamadas híperons (Λ , Σ , Ξ três variedades desses híperons). A intensa experimentação das décadas de 1950 e 1960 levou à produção de um grande número de partículas hadrônicas, análogas a excitações de nucleons, píons, káons e híperons; as propriedades desses estados foram sistematicamente estudadas, e sua grande proliferação motivou esforços para sua classificação e descrição unificada. Nenhuma estrutura era então observada nessas partículas, e a proliferação não podia então ser explicada através de complexidade na organização de constituintes.

Um esquema de classificação para essa multidão de estados apareceu no início da década de 1960, utilizando o conceito de um grupo de simetria unitária, SU(3), em extensão ao grupo da simetria SU(2) do isospin. Esse esquema de simetria continha como elementos fundamentais três entidades básicas, correspondentes à representação fundamental do grupo. Essas entidades, então chamadas quarks, possuíam os atributos de isospin e de estranheza necessários para a determinação das propriedades de todos os hádrons, mas de início não foram necessariamente vinculadas a constituintes, no sentido material, desses hádrons.

Em 1969, experimentos de colisão de elétrons de altas energias com nucleons, realizados no acelerador do SLAC (Stanford, USA), indicaram a existência de granulação na estrutura dos nucleons, que então se revelaram como formados por constituintes de dimensões diminutas. Logo estes constituintes foram identificados como sendo os próprios quarks do esquema SU(3). Centenas de hádrons então conhecidos passaram a ser descritos em termos de apenas três componentes fundamentais: dois quarks, u (up) e d (down), sem estranheza, contendo os atributos de isospin, e um quark s (strange), que entra, juntamente com os quarks de tipo u e d, como constituinte nas partículas estranhas. O número de tipos de quarks aumentou para quatro em 1974, com

a descoberta de um novo atributo interno da matéria hadrônica, chamado charm, c. O número aumentou ainda para cinco em 1979, com a descoberta de um novo tipo de quark, b, chamado bottom, ou beauty.

O esquema teórico que atualmente constitui o progresso consolidado na Física das Partículas Elementares, chamado Modelo Padrão, a ser descrito mais adiante, requer que os quarks existam em pares: d,u; s,c; b,t. O t aqui descrito (quark top) não foi ainda descoberto, mas a maioria dos físicos acredita que a ausência seja provisória: novos aceleradores em construção serão capazes de produzi-lo. O motivo dessa crença reside no sucesso do Modelo Padrão, que até hoje tem recebido completa confirmação experimental.

Os quarks possuem spin $1/2$, e cargas elétricas que são frações da carga do próton ou do elétron: carga $-1/3$ para d, s, b, e carga $+2/3$ para u, c, t. Dizemos que os 6 tipos de quarks correspondem a 6 diferentes sabores (flavors), os quais, como veremos, são atributos que determinam o modo como cada um deles participa na chamada interação fraca, da qual falaremos adiante. A cada quark corresponde um antiquark; assim temos 6 tipos de antiquarks, indicados por d, u, s, c, b, t, com cargas elétricas opostas às dos quarks correspondentes.

Cargas elétricas fracionárias nunca foram observadas em partículas isoladas: quarks não podem ser extraídos de dentro dos hádrons. Só se observam sistemas com três quarks, que são os bárions - hádrons de spin semi-inteiro - ou sistemas com um quark e um antiquark, que são os mésons - hádrons de spin inteiro. Dizemos que os quarks estão confinados pela interação forte que os liga no interior de sistemas hadrônicos bem definidos, segundo critérios (confinamento de cor) que serão explicados adiante.

1.2. Partículas Elementares: Léptons

O elétron, descoberto em 1897 por J.J. Thompson, é constituinte essencial dos átomos, de cuja estrutura participa através da sua interação eletromagnética com os prótons do núcleo e com outros elétrons. O elétron aparece também como produto da desintegração do nêutron livre, o qual se transforma espontaneamente em um próton, com emissão de um elétron e de uma outra partícula de spin $1/2$, de massa muito pequena, provavelmente nula, chamada neutrino. Esses processos de desintegração são regidos por uma interação de natureza diferente daquela que ocorre entre quarks no

processo de confinamento, e daquela que mantém os elétrons em órbitas ao redor dos núcleos; essa interação, chamada de interação fraca, é de curto alcance, e de muito baixa intensidade.

Em observações de raios cósmicos - partículas provenientes do espaço exterior, e que penetram na atmosfera terrestre com grandes velocidades - foi observada em 1936 uma partícula chamada múon, de massa 200 vezes maior do que a do elétron, e que tem interações completamente análogas a ele. O múon se desintegra em um elétron e dois neutrinos: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$. Ao colocamos os índices μ e e para indicar que há duas variedades de neutrino - uma associada ao elétron e outra associada ao múon. Também colocamos uma barra sobre o neutrino do elétron, $\bar{\nu}_e$, para indicar que ele é um antineutrino, o qual é diferente do neutrino, do mesmo modo que elétron é diferente de pósitron, e o μ^- é diferente do μ^+ . Há leis específicas de conservação das qualidades eletrônicas e muônicas e da natureza partícula/antipartícula (especificadas através de atributos numéricos, chamados números eletrônicos e muônicos) nos processos que envolvem múons, elétrons e os dois tipos de neutrino.

Em 1974, outra partícula, em tudo análoga ao múon e ao elétron, exceto por sua massa elevada, de 1784 MeV, foi observada no SLAC. Esta partícula é chamada tau, τ , e a ela está associado um neutrino, ν_τ , e um número tauônico, o qual é conservado, como o são os números muônicos e eletrônicos.

Essas partículas análogas ao elétron, exceto pelos valores de suas massas, e por terem carga nula (os neutrinos), são em conjunto chamadas léptons. As que possuem carga elétrica participam nas interações eletromagnéticas, e todas participam nas interações fracas. Pode ser que os neutrinos tenham todos massa zero, embora, experimentalmente, se possa apenas falar em um limite superior para os valores possíveis dessas massas.

Ao nível do conhecimento atual, os léptons são partículas elementares, sem estrutura, e sem dimensões mensuráveis. Há seis léptons, mais suas seis correspondentes antipartículas.

1.3 Partículas Elementares: os Bósons Vetoriais Intermediadores da Interação Forte: Glúons

Os quarks, com seus números quânticos de carga ($-1/3$ e $2/3$ da carga do próton), spin ($1/2$) e sabores (d, u, s, c, b, t), junto com os correspondentes antiquarks, fornecem um esquema perfeitamente satisfatório para se explicar a estrutura de todos os hádrons até hoje observados. Nessa afirmação estamos levando em conta apenas as configurações, em números quânticos de momento angular e de atributos internos, que podem ser construídas utilizando-se três quarks para formar os bárions, e um par quark-antiquark para formar os mésons. As questões dinâmicas - como os quarks interagem para manter essas estruturas, quais são os valores gerados para as massas e outras propriedades estáticas, etc - exigem o estabelecimento de uma teoria específica. Esta teoria substitui a antiga teoria das forças nucleares que procurou tratar das interações entre hádrons utilizando os próprios hádrons como mediadores de suas interações.

No modelo a quarks para os hádrons, é necessário colocar-se dois, e até três, quarks idênticos ocupando estados que têm todos números quânticos iguais. Como os quarks são férmions, estas estruturas violam o Princípio de Exclusão de Pauli. A manutenção do Princípio requer a existência de um atributo adicional para os quarks, o qual deve poder tomar ao menos três valores distintos: digamos que os quarks existem em três cores diferentes - amarelo, azul e vermelho, por exemplo. Nenhum significado físico deve ser atribuído a esses nomes de cores, nem à própria palavra cor, neste sentido.

O número 3 para a variedade de quarks de um mesmo sabor encontra algumas evidências quantitativas com base experimental, como por exemplo o tempo de vida para decaimento do π^0 em dois fótons, e a razão de produção de hádrons em colisões de elétrons e pósitrons a altas energias.

O atributo cor, na forma de um índice numérico que pode assumir três valores, é utilizado para se construir a teoria das interações entre quarks, chamada Cromodinâmica Quântica (QCD). O índice de cor é utilizado como um índice da simetria $SU(3)$, à qual se faz usualmente referência com um sufixo c (c significando cores) na forma $SU(3)_c$ para distingui-la da simetria $SU(3)$ de sabores, da qual falamos antes.

Postula-se que os hádrons fisicamente possíveis são estruturas escalares no índice de cores, isto é, são invariantes sob transformações do grupo $SU(3)_c$. Sabe-se da teoria

dos grupos unitários que esses escalares, que constituem singletos de cores (multipletos do grupo $SU(3)$ formados por um único estado), podem ser formados por sistemas com três quarks ou por sistemas de um quark e um antiquark. Podemos dizer que as cores se neutralizam nessas configurações, e que os hádrons são estruturas sem cor global (digamos, são brancas, ou incolores), embora sejam formados por componentes coloridos. Como os quarks nunca puderam ser isolados, podemos dizer que a natureza proíbe que se isole componentes coloridos: as cores são confinadas ao interior dos hádrons:

À semelhança da eletrodinâmica quântica (QED), que é uma teoria extraordinariamente bem sucedida para as interações eletromagnéticas entre férmions, a QCD adota um formato de teoria de calibre (teoria de gauge, ou teoria de escala). As interações entre quarks se processam através de um campo mediador vetorial (de spin 1); pela emissão (virtual, como nos diagramas de Feynman da QED) de um glúon, o quark, em geral, troca de uma cor para outra. O glúon transporta, em dois índices numéricos de $SU(3)_c$, a informação sobre esta troca de cores ocorrida no quark que o emite. O glúon é absorvido por um quark capaz de sofrer a troca de cores inversa; o saldo líquido da emissão e absorção do glúon consiste na permutação de cores entre os dois quarks.

Do mesmo modo como há 8 geradores independentes no grupo $SU(3)$, há 8 tipos de glúons, caracterizados pelos valores numéricos de seus dois índices (cada um dos índices varia de 1 a 3; entre as nove possibilidades, uma é eliminada por constituir um escalar). Os glúons da QCD são partículas de spin 1, isto é, são partículas vetoriais em termos de variáveis do espaço-tempo; suas massas são exatamente iguais a zero. O confinamento da cor exige que os glúons sejam eles também confinados ao interior de sistemas hadrônicos incolores.

Como o glúon possui índices de cores (dizemos que o glúon transporta cores), pode interagir com outro glúon, o que implica em propriedades marcantes para a cromodinâmica quântica. Nesse aspecto, o glúon é diferente do fóton, que é neutro, não transporta carga, e não interage diretamente com outro fóton.

Uma propriedade característica da QCD consiste na diminuição da intensidade do acoplamento entre quarks e glúons em energias muito altas, ou, equivalentemente, nas distâncias pequenas, como as características do tamanho dos hádrons. Essa propriedade, chamada de liberdade assintótica, permitiu a interpretação do espalhamento de elétrons por hádrons nos experimentos do SLAC de 1969 em termos de centros espalhadores de pequenas dimensões (os pártons).

Não foi ainda demonstrado se o confinamento da cor, que é a principal característica das interações fortes, é uma propriedade decorrente da QCD. Quando, pelo efeito de uma colisão violenta os quarks tendem a se separar, há uma reorganização global da distribuição de cores, os quarks que se afastam fazendo-se acompanhar de outros quarks ou antiquarks, que devem então ser produzidos, resultando, ao final, que da pequena região de dimensões hadrônicas saiam apenas *legítimos hádrons incolores*. Esse processo chama-se fragmentação, e devido a sua extrema complexidade, é, até agora, inacessível a cálculos teóricos. Uma das características desse esquema é a formação de jatos entre os hádrons produzidos nos processos de altas energias: os hádrons tendem a ser emitidos agrupados em torno de direções definidas pelos quarks que procuram se afastar.

A QCD no regime de distâncias inter-hadrônicas, ou de energias médias, oferece problemas de resolução muito difícil, devido a não-linearidade das equações, e a alta intensidade das interações, que impossibilitam o uso de métodos perturbativos. Recursos computacionais de elevadíssima capacidade são requeridos para o tratamento dos problemas, mesmo os mais simples, na QCD no regime de confinamento. A física dos hádrons - descrição de suas propriedades e interações - oferece os mais difíceis desafios para a Física das Partículas Elementares no momento, e, a menos que caminhos inteiramente novos sejam descobertos, pode-se prever que assim continuará sendo durante a próxima década.

1.4. Partículas Elementares: os Bósons Intermediadores da Interação Eletrofraca: Fóton, W^+ , W^- , Z^0

A desintegração beta de materiais radioativos com emissão de elétrons, descoberta por Rutherford em 1898, a desintegração do píon com a produção de múons, descoberta em 1947, a desintegração desses múons com produção de elétrons, e muitos outros processos, inclusive muitos envolvendo partículas estranhas, são manifestações de uma mesma interação fundamental da natureza, chamada interação fraca. Devido a sua pequena intensidade e seu curtíssimo alcance, esta interação não é determinante dos fenômenos que observamos na nossa vida diária, nem das propriedades macroscópicas dos materiais com que tratamos usualmente. Entretanto, ela teve, e continua tendo, um papel primordial no desenvolvimento da estrutura das teorias físicas fundamentais.

A natureza contínua da distribuição de velocidades dos elétrons resultantes das desintegrações beta levou Pauli, em 1931, a formular a hipótese de existência do neutrino. Fermi utilizou esta hipótese para formular em 1934 uma teoria para a desintegração beta que tem muitas das características da formulação mais atual. Após a descoberta da não-conservação de paridade nas interações fracas em 1956, Lee e Yang chegaram à forma para essa interação que era compatível com a totalidade das observações experimentais disponíveis. A interação fraca de partículas estranhas foi incorporada de modo natural neste esquema, dentro do contexto da simetria SU(3). Os neutrinos, eletrônicos e muônicos, são elementos essenciais nessa dinâmica da interação fraca, aparecendo af sempre associados aos respectivos léptons carregados.

O esquema introduzido por Fermi para explicar a produção de léptons, assim como o utilizado por Lee e Yang, estabelece uma interação de contato entre quatro férmions: dois bárions e dois léptons. A forma da interação, e os cálculos e aplicações correspondentes, prescindem de um campo mediador, e descrevem de modo satisfatório os resultados experimentais. Entretanto, a forma da interação, que consiste no produto escalar de duas correntes vetoriais e pseudo-vetoriais, mostra de modo óbvio qual deveria ser a natureza de um campo mediador, e como introduzi-lo, pois a analogia com a interação eletromagnética é nítida. O campo mediador é vetorial, constituído por partículas carregadas W^+ e W^- (esses bósons são carregados porque o par leptônico produzido, elétron e neutrino, também o é, e os hádrons envolvidos sempre sofrem, no seu conjunto, uma variação unitária de carga). O campo mediador não é necessário para explicar os experimentos de desintegração, porque as energias envolvidas são muito baixas; se os bósons W^+ e W^- possuem massas elevadas, seus efeitos não apresentam nenhuma estrutura observável, e os quatro férmions envolvidos aparecem como interagindo todos em um mesmo ponto do espaço.

Apesar do sucesso dos cálculos perturbativos que levam à descrição dos experimentos, a teoria das interações fracas, conforme formulada por Fermi, Lee e Yang, sofre de uma doença gravíssima, que é a sua não-renormalizabilidade: cálculos de diagramas relevantes levam a resultados infinitos, qualquer que seja o processo calculado. A existência do campo mediador modifica a natureza das divergências, mas não as elimina.

Weinberg e Salam introduziram em 1967-1968 um esquema que unifica as interações fracas e eletromagnéticas, em termos de uma teoria de calibre na qual o bóson intermediário tem 4 componentes: uma delas corresponde ao fóton usual, duas aos bósons carregados W^+ e W^- mencionados antes, e outra a mais um bóson neutro, Z^0 . Este bóson Z^0 leva à previsão de ocorrência de processos típicos das interações

fracas, mas com correntes neutras: um processo de interação fraca poderia ser induzido por um par leptônico de carga total nula. Em 1971, G.'tHooft mostrou que esta teoria é renormalizável, ficando assim eliminadas as divergências fatais da interação fraca não-unificada.

A existência das correntes fracas neutras assim previstas foi confirmada experimentalmente em 1973, consolidando o esquema de tratamento das interações eletromagnéticas e fracas em uma interação única. Essa unificação pode ser considerada como uma das mais importantes realizações conceituais atingidas em toda a história da Física de Partículas e Campos. Devemos lembrar que a unificação de interações anteriormente descoberta, aquela que reuniu magnetismo e eletricidade em uma teoria única, foi identificada por Maxwell mais de cem anos antes, e teve consequências espetaculares para o conhecimento e a utilização dos fenômenos naturais.

A interação eletrofraca descrita acima, que foi construída para explicar transições de hádrons e léptons, é facilmente adaptada à linguagem dos quarks. Como interação fundamental, a teoria eletrofraca deve descrever a interação entre partículas realmente elementares. Quando um nêutron se transforma em próton emitindo um bóson W^+ , na realidade ocorre em seu interior a emissão de W^+ por um quark d (carga $-1/3$), que se transforma em um quark u (carga $+2/3$); o sistema de três quarks passa de udd (nêutron) a uud (próton).

Todos os sabores de quarks (u,d,s,c,b,t) são capazes de emitir ou absorver os bósons intermediários da interação eletrofraca - γ, W^+, W^-, Z^0 . De fato, não se pode realmente fazer tal afirmação em relação ao quark top, t, que não foi ainda produzido, mas o Modelo Padrão - no qual se acredita - atribui a ele propriedades análogas aos demais. A interação fraca trata das transições entre quarks que envolvem os bósons mediadores dessa interação, sendo os sabores dos quarks atributos relevantes na determinação dessas transições. A intensidade básica característica de cada transição entre dois sabores deve, no estágio atual do conhecimento, ser determinada experimentalmente. O Modelo Padrão não contém elementos suficientes para a previsão dessas intensidades, as quais são usualmente parametrizadas e organizadas na forma de uma matriz, chamada de Kobayashi-Maskawa.

A determinação - essencialmente experimental - dos parâmetros que governam as transições entre pares de sabores na interação eletrofraca, isto é, dos elementos da matriz de Kobayashi-Maskawa, constitui um esforço sistemático importante para testes detalhados do Modelo Padrão, e para o estabelecimento do conhecimento necessário para o desenvolvimento futuro da teoria mais geral que poderá fazer a previsão unívoca

dessas quantidades. Podemos prever que esse esforço sistemático se estenderá por toda a próxima década.

1.5. Quebras de Simetria: Bósons Escalares: Partículas de Higgs

As simetrias de calibre da cromodinâmica quântica e da teoria da interação eletrofraca requerem que todos os quarks tenham a mesma massa - entretanto, eles possuem massas que variam de poucas centenas a dezenas de milhares de MeV. Por outro lado, os bósons intermediários da interação eletrofraca deveriam todos ter a mesma massa zero - entretanto, o fóton tem massa nula, enquanto que o W^+ e o W^- possuem massas de 82 GeV, e o Z^0 possui massa de cerca de 93 GeV. Os léptons carregados possuem massas de 0,5, 106 e 1740 MeV. A origem desses complicados espectros de massas está necessariamente localizada fora dos esquemas de simetria, requerendo ingredientes não contidos nas teorias de calibre das duas interações fundamentais. Os parâmetros da matriz de Kobayashi-Maskawa, que indicam as intensidades relativas das transições entre quarks nas interações fracas, devem também ser devidos a agentes externos.

É sabido que, embora leis dinâmicas possuam certas simetrias, os estados físicos podem apresentar estruturas não simétricas. O processo chama-se quebra espontânea de simetria.

As diferentes manifestações de quebra de simetria são atribuídas a interações dos quarks, léptons e bósons com partículas escalares, as quais não foram ainda descobertas. No caso da interação eletrofraca, é requerido pelo menos um par de partículas escalares, chamadas partículas de Higgs. Outras podem existir: nada se sabe sobre seu número, ou suas massas, ou suas interações.

O fato de que as partículas escalares não foram ainda encontradas experimentalmente constitui atualmente um problema fundamental na Física de Partículas Elementares. Segundo o conhecimento atual, essas partículas são necessárias para que se possa compatibilizar os esquemas teóricos com a realidade física; elas poderão esclarecer as razões para os espectros de massas, para as intensidades das interações, para os ângulos de mistura entre estados, para a violação das interações fracas sob CP (produto das operações de conjugação de carga e de paridade), etc.

Sendo talvez o problema mais crítico nessa área, a busca das partículas escalares deverá exigir muito esforço nos próximos anos. Se suas massas estiverem próximas de

1000 GeV, a próxima geração de aceleradores permitirá atingi-las, e elas poderão aparecer. O esforço não será apenas experimental, pois muito cálculo de fenomenologia será necessário para prever e interpretar o comportamento das partículas escalares. Entretanto, mais esforço ainda poderá se necessário, se elas não aparecerem, para se encontrar idéias e soluções alternativas para os problemas das quebras de simetria.

1.6. O Esquema Atual (Modelo Padrão) e Algumas Questões

Conhecemos atualmente 3 tipos de léptons carregados (elétrons, múons, táuons) de massas muito diferentes: há um fator de cerca de 200 entre a massa do múon e a do elétron, e um fator da mesma ordem de grandeza entre as massas do táuon e do múon. Para cada um desses léptons carregados há um neutrino que lhe é associado. Há as antipartículas correspondentes. Uma lei de conservação absoluta separa os léptons em famílias: números quânticos eletrônicos, muônicos e tauônicos são separadamente conservados. Essas famílias são também chamadas de gerações.

Os quarks também apresentam grandes diferenças de massas: u, d, com massas de centenas de MeV, s e c no intervalo de 500 a 1.600 MeV, e b, t acima de 4.500 MeV. Podemos distribuí-los, nessa ordem de massas crescentes, entre as mesmas três famílias/gerações onde estão os léptons. Assim, a primeira geração de férmions compreende os léptons e^- , ν_e , os quarks u, d, e suas correspondentes antipartículas. A matéria usual é formada exclusivamente por férmions da primeira geração.

Todos os férmions fundamentais conhecidos ficam assim organizados em 3 famílias, cada uma contendo 2 léptons e 2 quarks, assim temos os pares

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}.$$

e mais os correspondentes pares de antipartículas. A interação fraca determina a transição entre os elementos de dois quaisquer desses pares.

Os símbolos com linha d', s', b' escritos acima representam misturas dos quarks de mesma carga d, s, b, que aparecem nas interações fortes, com coeficientes de mistura representados na matriz de Kobayashi-Maskawa. Essas combinações determinam transições entre quarks de diferentes gerações.

A interação eletrofraca descreve os processos fracos e eletromagnéticos em termos de um tripleto de correntes (análogo a um tripleto do grupo de simetria $SU(2)$, com componentes de cargas $+, -, 0$) envolvendo léptons e quarks de helicidade negativa, e mais um singleto de corrente neutra (como um elemento do grupo $U(1)$ envolvendo transições entre férmions de mesma carga, tanto com helicidades positivas como negativas. Os dois tipos de corrente são independentes, a relação entre suas intensidades sendo um parâmetro a determinar experimentalmente. Dizemos que a interação eletrofraca obedece ao produto de simetrias $SU(2) \times U(1)$.

A interação entre duas correntes de tripleto é transmitida por um campo constituído por um tripleto de bósons vetoriais, com cargas $+, -, 0$. A interação entre correntes neutras do singleto $U(1)$ é transmitida por um campo de bóson vetorial sem carga. As massas fisicamente observadas para esses bósons são determinadas por um processo de quebra de simetria determinado por um processo de quebra de simetria determinado por um agente externo a este esquema, resultando o fóton (γ) de massa zero, e três bósons com massa (W^+ , W^- , Z^0). Esses três bósons pesados foram produzidos e observados em 1983.

O modelo assim descrito chama-se Modelo Padrão da Interação Eletrofraca, e recebeu confirmação experimental em todos os detalhes até hoje investigados.

A quebra de simetria gerando as diferenças de massas entre os quatro bósons mediadores da interação eletrofraca é explicada em termos de um mecanismo (Higgs) que requer a intervenção de partículas escalares (pelo menos um dubleto de campos escalares complexos), as quais ainda não foram descobertas experimentalmente. A intervenção de partículas escalares (ou de algum mecanismo desconhecido) é necessária também para explicar as massas dos léptons e dos quarks, criar os ângulos de misturas entre estados que aparecem na matriz de Kobayashi-Maskawa, possibilitar a violação de CP, etc. Nenhuma dessas partículas escalares foi descoberta até hoje, o que constitui atualmente um problema muito importante para a Física das Partículas Elementares, pois não se conhece outro modo simples para explicar todos esses fatos.

As interações fortes da cromodinâmica quântica (QCD) são mediadas pelos 8 glúons coloridos, a interação sendo descrita pelo esquema de simetria $SU(3)_c$ que descrevemos antes. A QCD é uma teoria muito difícil de testar, devido a seu caráter altamente não-linear, à limitação no uso de métodos não perturbativos, à complexidade do fenômeno de confinamento, etc.

· Reunindo a QCD e a interação eletrofraca em um esquema descrevendo todas as interações entre partículas, dizemos que o Modelo Padrão estendido obedece ao produto de simetrias

$$SU(3)_c \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

havendo $8 + 3 + 1 = 12$ bósons vetoriais mediadores para interações fundamentais entre partículas (*gravitação excluída*). Há 6 léptons, e suas 6 antipartículas. Há 6 tipos de quarks, e suas 6 antipartículas, cada um podendo apresentar-se em 3 diferentes cores. Juntando mais os misteriosos bósons escalares, temos aí o conjunto completo das partículas elementares, conforme o conhecimento atual.

Este esquema nos oferece um conjunto de ingredientes, possivelmente correto. Mas podemos formular algumas questões que exemplificam insuficiências nesse atual nível de conhecimento, e que mostram deficiências em sua utilização e em sua comprovação.

1. O Modelo Padrão tem muitas arbitrariedades, e não pode, a rigor, ser considerado como um esquema de unificação suficiente das interações fracas e eletromagnéticas. Qual mecanismo determina os valores das massas dos bósons pesados W^+ , W^- , Z^0 ? Como são fixadas as intensidades das interações entre pares de léptons? Por que são em número de 3 as gerações de férmions?

2. Por que as massas dos léptons têm os valores que medimos?

3. A QCD é a teoria correta para as interações fortes? Por que há confinamento? Como usar, ou testar a teoria das interações fortes em processos hadrônicos? Como calcular um processo de fragmentação?

4. Há um esquema de unificação superior, reunindo a interação eletrofraca e a interação forte? A interação gravitacional poderia participar também em um esquema unificado?

5. Os léptons e quarks são realmente elementares, ou possuem estruturas internas (preons)?

Essas poucas perguntas são do tipo das que motivam permanentemente os esforços dos físicos de partículas elementares. Elas são uma pequena exemplificação da

enorme quantidade de problemas a serem enfrentados na próxima década, e em outras que lhe seguirão.

1.7. A Unificação das Interações Fundamentais

Visto do modo mais global, a Física de Partículas e Campos trata com dois tipos de conceitos/entidades: as partículas elementares, e as interações básicas entre elas. A busca das partículas mais fundamentais que constituem a matéria, e cujas combinações explicam sua variedade, é um programa que atende a uma solicitação intelectual inerente ao homem civilizado, acompanhando-o desde tempos remotos. A identificação dos tipos de forças fundamentais existentes na natureza, capazes de explicar todos os fenômenos físicos, constitui o outro projeto principal da Física de Partículas e Campos.

O conjunto dos fenômenos relevantes para a descrição da estrutura e do comportamento da matéria revela quatro interações fundamentais na natureza: 1) a interação forte, responsável pelo confinamento dos quarks e antiquarks no interior dos hádrons, e pela constituição dos núcleos atômicos; 2) a interação eletromagnética, responsável pela atração entre elétrons e prótons, determinando a estrutura e as propriedades químicas dos átomos e moléculas, e o comportamento dos materiais em escala macroscópica; 3) a interação fraca, em termos da qual são descritos processos de desintegração de partículas instáveis, inclusive parte dos fenômenos de radioatividade natural; 4) a interação gravitacional, que é desprezível quando consideramos uma partícula elementar agindo sobre outra, devido aos pequenos valores de suas massas.

A unificação entre a eletricidade e o magnetismo, demonstrada por Maxwell em 1830, criou um modelo ideal do ponto de vista teórico, ao mesmo tempo que abriu caminho para a investigação de fenômenos novos. As forças elétricas e magnéticas apresentam intensidades semelhantes nos fenômenos macroscópicos acessíveis à experimentação daquela época, e a estrutura das leis que regem o eletromagnetismo pôde então ser encontrada.

Outros esquemas de unificação foram tentados, por Einstein e seus seguidores, procurando reunir gravitação e eletromagnetismo no mesmo quadro teórico. Essas tentativas tiveram pouco êxito.

As quatro interações fundamentais (forte, eletromagnética, fraca e gravitacional) apresentam-se com intensidades muito diferentes em todos os fenômenos analisados até a metade do presente século. Essas diferenças de intensidades permitem o estudo

individualizado dessas interações, facilitando a determinação de suas propriedades, ao mesmo tempo que dificultam a investigação de esquemas que as unifiquem. É necessário buscar-se condições especiais nas quais as interações possam competir, e sua interferência aparecer, de alguma forma. Assim, a intensidade da interação fraca entre partículas que colidem aumenta quando cresce a energia da colisão, aproximando-se da intensidade da interação eletromagnética. Às energias de centenas de GeV dos grandes aceleradores atuais, fenômenos podem ser observados nos quais o esquema unificado das duas interações pode ser investigado em detalhe.

A unificação atingida pelo Modelo Padrão da interação eletrofraca, embora esteja recebendo completa confirmação experimental, deve ser considerada incompleta, ou insatisfatória, por possuir um grande número de constantes arbitrárias, as quais têm que ser determinadas experimentalmente. A origem dos valores desses parâmetros numéricos, assim como dos aspectos mais gerais do modelo, tais como a configuração das famílias de quarks e léptons, e o número dessas gerações, é desconhecida no momento. Essa origem poderia residir na existência de partículas mais fundamentais como constituintes dos quarks e léptons, ou poderia ser explicada por um esquema unificando a interação forte (QCD) e a interação eletrofraca. Um esquema desse tipo chama-se de Grande Unificação.

A interação eletrofraca cresce quando a energia aumenta, enquanto que a força da QCD diminui. Suas magnitudes se tornam comparáveis a energias enormes, de cerca de 10^{15} GeV, inacessíveis à experimentação direta atual. Naturalmente poderá ser difícil, em época previsível, testar todos os detalhes de uma teoria grande-unificada, de maneira análoga ao que se faz atualmente com a teoria eletrofraca, mas é calro que qualquer indicação sobre a validade de um esquema unificado seria de extrema importância. Em ambas as teorias, eletrofraca e QCD, férmions trocam bósons de calibre. A ampliação das duas teorias, permitindo-se a troca de bósons de calibre conectando quarks e léptons de modo mais simétrico do que os modos que governam as duas interações separadamente, leva à previsão de conversão de hádrons em léptons. Pelo esquema teórico mais simples e natural, o próton seria instável, podendo decair em $\pi^0 + e^+$ ou em $\pi^+ + \nu_e$. A vida média prevista para essa desintegração do próton é de cerca de 10^{30} anos, e experimentos foram montados com grande quantidade de matéria, devidamente isolada, procurando-se observar o processo extremamente raro de desintegração de prótons. Os resultados desses experimentos têm sido negativos, e o caminho para a Grande-Unificação permanece desconhecido.

Outros esquemas teóricos foram criados com a finalidade de explicar a estrutura da interação eletrofraca, o mistério dos bósons de Higgs, a variedade de tipos de quarks

e léptons. Alguns esquemas são internamente e teoricamente consistentes, como a chamada supersimetria e a chamada tecnicolor, que requerem como ingredientes muitas partículas não observadas, e que prevêem muitos estados e processos também não existentes.

A interação gravitacional entre as partículas elementares é muito fraca. Apenas a energias incrivelmente altas, da ordem de grandeza da massa de Planck, 10^{19} GeV, ela se torna comparável às outras interações. A natureza dessa interação não é bem compreendida até hoje. Não há tratamento quântico satisfatório para ela, e seu bóson mediador, chamado gráviton, não foi ainda descoberto.

Assim, as tentativas de unificação das interações eletrofraca, forte e gravitacional, estão longe de levarem a um esquema que tenha base experimental comprovadamente válida. As ambições são grandes: explicar o número de gerações, as semelhanças e diferenças entre os quarks e os léptons, quantificar coerentemente as cargas elétricas dos quarks e dos léptons de modo a explicar a exata neutralidade da matéria no universo, estabelecer uma escala de massa para as partículas fundamentais e prever seu espectro, explicar a assimetria entre matéria e antimatéria no universo. Tudo indica que esses esforços realizados no sentido de se obter uma descrição simples, consistente e unificada das partículas e suas interações estarão sendo desenvolvidos durante muitas décadas vindouras. A busca desse conhecimento fundamental da natureza constitui a razão e a definição dessa área da ciência chamada Física de Partículas e Campos.

TABELA I

OS FÉRMIONS (SPIN= 1/2) FUNDAMENTAIS: LÉPTONS E QUARKS						
Gerações	LÉPTONS			QUARKS		
	Sabores	Cargas Elétricas	Massas (MeV)	Sabores	Cargas Elétricas	Massas* (MeV)
I	ν_e	0	$\lesssim 0,000050$	u	2/3	300
	e^-	-1	0,51	d	-1/3	300
II	ν_μ	0	$\lesssim 0.5$	c	2/3	1600
	μ^-	-1	106	s	-1/3	500
III	ν_τ	0	$\lesssim 150$	t^\dagger	2/3	$\gtrsim 25000$
	τ^-	-1	1784	b	-1/3	4800

* As massas dos quarks não são medidas diretamente, porque quarks não podem ser isolados. Esses números são aproximados, e inferidos indiretamente.

† O quark t não foi ainda identificado experimentalmente


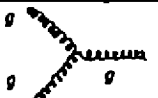
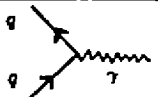
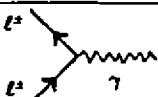
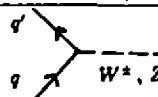
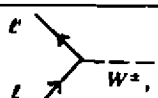
TABELA II

OS BÓSONS (SPIN= 1) DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS					
BÓSONS		Massas (MeV)	Intensidades Típicas das Forças entre Partículas	Alcance Típico da Interação	Fermiões Atuantes
INTERAÇÃO FORTE	Gluons g (oito)	0	1	$< 10^{-13}$ cm	Quarks
INTERAÇÃO ELETROFRACA	Fóton γ	0	10^{-2}	Infinito	Quarks e Léptons Carregados
	Pesados: W^{\pm} Z^0	83.000 92.000	10^{-13}	10^{-16} cm	Quarks e Léptons
INTERAÇÃO GRAVITACIONAL	Gráviton* ?	0	10^{-28}	Infinito	Todas Partículas com Massa

* O gráviton não foi ainda descoberto.

A linha pontilhada na interação eletrofraca corresponde à quebra espontânea de simetria, possivelmente induzida por partículas escares.

TABELA III

AS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS: FORTES, ELETROMAGNÉTICAS E FRACAS		
TIPOS	INTERAÇÕES LOCAIS	ATRIBUTOS ATUANTES
FORTES		CORES
		CORES
ELETROMAGNÉTICAS		CARGAS ELÉTRICAS
		CARGAS ELÉTRICAS
FRACAS		SABORES
		SABORES

2. TEORIA QUÂNTICA DOS CAMPOS

A teoria quântica dos campos tinha originalmente como objetivo fornecer um formalismo adequado à descrição das partículas elementares. Entretanto, a par dos sucessos iniciais da Eletrodinâmica Quântica, logo ficou evidenciada a existência de muitos pontos teóricos obscuros e que a teoria necessitava de um exame detalhado de suas bases. Estas investigações por seu lado abriram novas fronteiras que fazem contato com outras áreas da física, revelando uma estrutura bastante rica e complexa. Os dois próximos parágrafos ilustram alguns desses fatos.

O desenvolvimento da teoria de campos Euclidiana ocorrido no final da década de sessenta, notadamente devido aos trabalhos de K. Symanzik, propiciou o surgimento de aplicações ao estudo de sistemas da mecânica estatística. Conjugada com as idéias do grupo de renormalização e da teoria de campos a temperatura finita (o chamado formalismo do tempo imaginário) a teoria Euclidiana foi aplicada na última década ao estudo de transições de fase e a determinação de expoentes críticos.

A procura de alternativas à teoria perturbativa tradicional, motivou o desenvolvimento de uma variedade de novos métodos (métodos semi-clássicos, teorias na rede, expansão $1/N$) cuja utilidade transcende a motivação inicial. Assim, o estudo de métodos semi-clássicos conduziu à descoberta de novos setores nas soluções da teoria dos campos (solitons). Devido a sua estabilidade essas soluções tem sido úteis no estudo de alguns problemas da Física da Matéria Condensada como supercondutividade e superfluidez. A estabilidade das soluções tipo soliton (monopolos, instantons, vórtices, etc.) decorre de aspectos topológicos do modelo em estudo. A relevância desses aspectos topológicos pode então ser apreciada, ensejando a investigação de modelos em espaços de geometrias diversas.

Com o objetivo da simplificação de modo a isolar os aspectos que se deseja investigar, tem se revelado útil o estudo da Teoria dos Campos em dimensões do espaço-tempo diferentes de $(3+1)$. Assim, os modelos em duas dimensões $(1+1)$, mostraram-se úteis para o entendimento de fenômenos tais como o confinamento dos quarks, geração dinâmica de massa dos quarks e liberdade assintótica, problemas inerentes à Cromodinâmica Quântica. A utilidade desses estudos na área da matéria condensada é ilustrada pela solução do problema de Kondo que se refere as propriedades de baixas temperaturas de certos materiais não magnéticos. Mais recentemente, uma teoria baseada num modelo bi-dimensional, a Supercorda, foi proposta como candidata a teoria unificada de todas as interações.

Nos últimos três anos, teorias em três dimensões, $(2+1)$, despertaram interesse devido à descoberta de que o spin das partículas nessa dimensão pode adquirir valores arbitrários, intermediários entre os valores inteiros e semi-inteiros dos bósons e férmions em quatro dimensões. Isto indica a existência de excitações que não correspondem nem a férmions nem a bósons. Estes entes, denominados anyons podem ser de importância fundamental para o entendimento de fenômenos aparentemente bidimensionais da Matéria Condensada, o efeito Hall fracionário e a supercondutividade de altas temperaturas de certas cerâmicas.

Dada a diversidade das áreas onde os métodos da teoria de campos são empregados, nesta exposição iremos focalizar apenas alguns dos assuntos que sofreram grandes avanços nos últimos anos. Estes assuntos são, naturalmente, objetos de interesse de vários grupos teóricos brasileiros.

2.1. Cromodinâmica Quântica

O advento da Cromodinâmica Quântica como uma teoria das interações fortes, na década de setenta, trouxe consigo novas dificuldades técnicas e conceituais. aparentemente existem duas fases da teoria. Numa delas, o acoplamento entre quarks e glúons, compatível com os fenômenos hadrônicos conhecidos, é extremamente forte: a constante de acoplamento é da ordem da unidade. Este fato inviabiliza a utilização da teoria de perturbações na constante de acoplamento como método de investigação. Não há nenhuma garantia de que o cálculo até uma certa ordem finita faça sentido, isto é, que forneça uma boa aproximação, digamos, para uma amplitude de transição. Conceitualmente, o principal problema é o confinamento dos quarks, isto é, o fato que estes entes, postulados como ingredientes básicos dos hádrons, se furtam à observação direta.

Numa outra fase, chamada de fase perturbativa, situada na região de altas energias a QCD se torna relativamente simples. Ocorre o fenômeno da liberdade assintótica e a constante de acoplamento efetiva torna-se pequena, justificando o uso de métodos perturbativos.

Os bons resultados qualitativos da QCD na fase confinante e o relativo sucesso dos cálculos perturbativos na região de liberdade assintótica (os chamados espalhamentos inelásticos profundos e os processos de Drell-Yan) fizeram com que mais e mais se acreditasse que ela seja realmente a teoria das interações fortes e que a

solução dos problemas mencionados esteja na sua riqueza estrutural não explorada. Novos efeitos e fenômenos relacionados à sua estrutura topológica não trivial foram descobertos. O principal desses efeitos é que o vácuo da teoria é um estado de mistura, o vácuo θ , de estados mais simples, os vácuos n . O mais importante índice desse fato são os instantons que se relacionam com as amplitudes de transição entre diferentes vácuos n . Os instantons são soluções topologicamente não triviais de ação finita. Sua descoberta por Belavin et al desencadeou uma corrida à procura de entes topológicos: solitons, instantons e seus efeitos na estrutura do vácuo. A idéia é que, construída sobre o vácuo correto que leva em conta o grosso dos efeitos topológicos, a teoria de perturbações faz sentido. Assim, grande esforço foi gasto no difícil problema de uma aproximação não perturbativa para o vácuo. A aproximação de gás diluído de instantons, tratável analiticamente não se mostrou suficiente e a pesquisa de um sistema de maior concentração, o líquido de instantons, é uma objetivo ainda não atingido. O confinamento dos quarks e glúons (confinamento de cor) e sua semelhança com o confinamento do fluxo magnético em materiais supercondutores leva entretanto a se acreditar que essa possibilidade seja realmente a direção para a solução.

2.2. Teorias na Rede

Evidentemente, não é só na direção da busca de efeitos topológicos que as pesquisas em QCD prosseguem. Uma alternativa à teoria usual de perturbações é a discretização do espaço. Nesse caso o espaço é visto como uma rede discreta de pontos. Pode-se com essa técnica procurar entender fenômenos de baixa energia e grandes distâncias. Com o aparecimento dos supercomputadores a abordagem computacional das teorias na rede tem se tornado cada vez mais ativa. O uso de tais supercomputadores é essencial pelo fato que as simulações dos modelos na rede são frequentemente empreitadas de grande porte, muito dispendiosas em termos dos seus requisitos computacionais de memória e de tempo de processamento. Uma grande parte do esforço computacional tem sido dirigido à compreensão da estrutura dos modelos definidos na rede, inicialmente nos modelos abelianos mais simples como as teorias com simetria $U(1)$ e $Z(n)$ e posteriormente com modelos não abelianos com simetria $SU(2)$ e $SU(3)$. Em particular, procura-se determinar a estrutura de fases e dos pontos críticos dos modelos. A dependência com a escala de distância e com o corte dos momentos no ultra-violeta, necessária para evitar o aparecimento de divergências (infinitos) nos cálculos, que é automaticamente introduzido com a rede tem sido também objetos básicos na investigação das propriedades das teorias na rede. Nessas investigações, foi muito importante a constatação da ausência de um ponto crítico entre a fase de acoplamento forte e a fase perturbativa da teoria de gauge com $SU(2)$. Esse resultado

leva a se acreditar que o confinamento verificado numericamente nas simulações possa continuar existente no limite do contínuo.

Tem-se tentado também fazer o cálculo numérico de muitas quantidades física relevante, com algum grau de sucesso. As principais quantidade físicas estudadas são as massas dos bárions, o intervalo de massa (mass gap) das teorias de gauge puras, os chamados glueballs, a força assintótica entre quarks, denominada de string tension, a temperatura de deconfinamento dos quarks e glúons, as características das excitações topológicas como monopolos e instantons, os momentos magnéticos dos estados ligados e as transições de fase quirais.

A introdução de campos de matéria nas teorias de gauge é mais fácil no caso de campos bosônicos. Este caso pode ser usado como um laboratório mas o procedimento não é realista devido a ausência de campos fermiônicos. Por outro lado a introdução de campos fermiônicos é bastante difícil, conduzindo a uma situação problemática do ponto de vista computacional. De fato, devido a ação ser linear e não quadrática nos campos fermiônicos, ocorre uma duplicação dos férmions no limite do contínuo. Além disso a ação de Dirac quando Euclidianizada não é positiva-definida, tornando impossível uma simulação direta pelos métodos de Monte Carlo.

A integral funcional fermiônica emprega números de Grassmann e sua contribuição pode ser expressa em termos de um determinante sobre a rede. Contrariamente ao caso com campos bosônicos, a expressão do determinante é altamente não local tornando as simulações extremamente complexas e dispendiosas.

Recentemente, o interesse pelas teorias abelianas tem sido reavivado e a abordagem na rede tem sido aplicada no caso da QED onde uma nova fase com uma nova constante efetiva de acoplamento extremamente forte foi detectada. Este é um resultado muito interessante podendo em princípio levar a uma nova interpretação da física dos fenômenos eletromagnéticos a altíssimas energias e a uma eventual relação com a Cromodinâmica Quântica.

Outra área onde a abordagem na rede tem já uma longa história é o esforço de quantização da gravidade. Embora os progressos ainda sejam lentos a abordagem pode levar a uma nova compreensão da dinâmica envolvida e sugerir caminhos possivelmente levando a unificação das forças da natureza.

2.3. Convergência da Série Perturbativa

É curioso que no final do século passado, quando as contradições da física clássica estavam a beira de começarem a aparecer, físicos importantes como Michelson imaginavam um futuro que para os físicos seria intelectualmente estéril, consistindo meramente no aprimoramento dos dados experimentais. Se pudessemos isolar uma certa classe de fenômenos eletromagnéticos a idéia de Michelson poderia parecer estar se realizando. O momento magnético anômalo do elétron é apenas um exemplo de uma concordância com a experiência, sem precedentes em nenhuma outra área da física. Mas, a despeito desse sucesso ímpar, um problema de natureza fundamental ainda persiste. Qual a verdade contida nos cálculos perturbativos? Já na década de cinquenta, Dyson, usando argumentos heurísticos sugeria que a série perturbativa é divergente. Cálculos feitos inicialmente por Landau indicam também a existência de problemas fundamentais se os cálculos são extrapolados para a região de altas energias. Admitindo a divergência da série como um fato, a próxima questão relevante é quão danosa é essa divergência. Se a série for divergente mas Borel somável é possível extrair informações corretas a partir dela. Isto acontece em mecânica quântica, no caso de uma classe de potenciais singulares, como por exemplo o oscilador anarmônico. A existência de efeitos não perturbativos leva em geral problemas de natureza mais grave no que se refere a convergência da série. Este é o caso em teorias com estado fundamental degenerado e com soluções do tipo instanton. Paradoxalmente, o procedimento de renormalização que do ponto perturbativo é aparentemente essencial leva também a problemas graves no que se refere a convergência da série. Nos anos oitenta, progressos notáveis foram obtidos no entendimento dessas questões. Foi assim possível estabelecer a somabilidade de Borel de certos modelos teóricos de campos e obter-se um quadro realista do problema da renormalização. A meta final dessas investigações é uma compreensão da realidade descrita pelas teorias básicas como a Eletrodinâmica Quântica e a Cromodinâmica Quântica. As pesquisas vigorosas nessas áreas devem prosseguir na década de noventa a fim que se possa passar do estágio das perguntas formais para o das respostas as questões formuladas pela pesquisa experimental.

2.4. Supersimetria e Supercordas

As teorias supersimétricas são teorias que apresentam uma simetria entre bósons e férmions. Um efeito importante dessa simetria é que as divergências, isto é, infinitos, que ocorrem nos cálculos de teorias de campos em geral tornam-se mais suaves. É mesmo possível construir-se teorias supersimétrica sem divergências ultravioletas. Foi

natural assim o aparecimento de propostas de teorias de gravitação supersimétricas, as chamadas teorias de supergravidade. Foi conjecturado que tais teorias, diferentemente da gravitação de Einstein, mantendo as divergências sob controle, seriam matematicamente consistentes. Como essas teorias prevêem a coexistência de várias partículas num mesmo múltiplo elas também traziam em si a idéia da unificação das forças básicas da natureza. Tais esperanças não foram todavia concretizadas. Divergências foram encontradas e dificuldades em ajustar o espectro de partículas conhecidas não foram até hoje superadas.

Mesmo assim, a idéia de unificação ganhou força com as teorias supersimétricas de modo que várias tentativas foram feitas para preservá-las. A primeira dessas tentativas propõe que o Universo tem onze dimensões, sete das quais estariam escondidas (em linguagem técnica, compactificadas). De um modo genérico essas teorias são chamadas de teorias de Kaluza Klein e, claramente, um dos problemas fundamentais dessas teorias é encontrar um mecanismo adequado para explicar a compactificação.

As interações fracas quebram a simetria de paridade e, para estar de acordo com esse fato experimental, o modelo de Weinberg Salam usa um certo tipo de férmion, chamado de férmion quirai. É um fato matemático a não existência de férmions quirais em onze dimensões. Por esse motivo as teorias supersimétricas em onze dimensões foram abandonadas e as investigações das teorias supersimétricas passaram para dez dimensões onde férmions quirais podem existir. Mas, existe alguma razão de princípio para a escolha de dez dimensões? A resposta a essa questão veio com a teoria das cordas supersimétricas ou supercordas. Por ser um objeto extenso, não é fácil a construção de uma teoria supersimétrica de cordas. De fato, a análise das possibilidades leva a conclusão que a teoria somente é consistente se a dimensão do espaço tempo for dez.

Por outro lado, os problemas encontrados na construção das teorias de supercordas sugerem que também elas não constituem a teoria fundamental. Talvez exista uma teoria mais fundamental baseada em algum princípio físico ainda desconhecido. A busca desse princípio conduziu nos anos recentes as chamadas teorias de campo topológicas que caracterizam-se por possuírem o estado de mais baixa energia, o vácuo, com uma estrutura não trivial. Protótipos dessas teorias foram construídos em três dimensões com uma ação proporcional ao chamado termo de Chern Simons. Hoje em dia existe já uma vasta lista de artigos inteiramente dedicados a este assunto. Nesse ponto lembramos que num outro contexto teorias de Chern Simons podem ter uma importância básica. A possibilidade de transmutação do spin que é ocasionada pela presença desse termo, fornece em princípio uma base para o entendimento do efeito Hall quântico fracionário e para a supercondutividade em cerâmicas com alto valor da

temperatura crítica. Um outro ponto que deve ser frisado também é que os estudos mencionados necessitam de um arsenal matemático poderoso, propiciando dessa forma o trabalho conjunto de físicos e matemáticos na busca de soluções.

A procura por teorias unificadas ocasionou uma aparente mudança de atitude nos físicos teóricos. A impossibilidade de comprovação experimental imediata dessas teorias colocou como primeiro teste para sua validade a consistência interna e a propriedade de, para baixas energias, reduzir-se ao modelo padrão das interações fortes e eletrofracas. Anteriormente a busca por consistência decorria de um processo dinâmico muito mesclado com a experiência.

2.5. Invariância Conforme

Apesar de conhecido desde o início do século, o grupo das transformações conforme passou a despertar um interesse mais acentuado após a descoberta do fenômeno de scaling nos processos de eletroprodução e o surgimento da hipótese de invariância de escala nos fenômenos críticos, formulada por Wilson e Kadanoff. Em particular, no final dos anos sessenta Wilson e Kadanoff introduziram a idéia de universalidade, pela qual uma vasta variedade de modelos produziram os mesmos expoentes críticos. Esta conjectura foi plenamente confirmada na década de setenta, através de inúmeros cálculos numéricos. Paralelamente a isso, como resultado da investigação do grupo conforme, foram descobertos vários aspectos importantes da teoria dos campos tais como liberdade assintótica e bosonização. Ainda na década de setenta, devemos mencionar o trabalho pioneiro realizado no Brasil, liderado por J.A. Swieca, assentando as bases para a solução da aparente contradição entre a simetria conforme e a causalidade.

O estudo das teorias com invariância conforme sofreu uma grande aceleração em meados dos anos oitenta, devido a um trabalho magistral de Belavin Polyakov e Zamolodchikov. Nesse trabalho foi proposto o uso de certos resultados matemáticos sobre álgebras de dimensão infinita no contexto da teoria quântica dos campos. Os números quânticos dessas álgebras foram associados às dimensões anômalas de um conjunto de campos. esta proposta é extremamente importante do ponto de vista prático pois as dimensões anômalas estão diretamente ligadas aos expoentes críticos. Dessa maneira, foi possível classificar o conjunto de expoentes críticos que caracterizam as transições de fase. A interpretação mencionada indicou também um caminho para o cálculo de funções de correlação.

2.6. Resultados Rigorosos

A década de oitenta acrescentou vários desenvolvimentos de grande importância ao estudo matematicamente rigoroso da Teoria Quântica dos Campos. Entre esses destacam-se os trabalhos sobre a estabilidade ultravioleta de teorias de gauge não abelianas em três e quatro dimensões, a construção rigorosa do modelo de Gross-Neveu em duas dimensões e a do modelo ϕ^4 em três dimensões. Esses trabalhos vieram coroar toda uma linha de pesquisa desenvolvida a partir dos anos setenta por Glimm e Jaffe e que como consequência fundamental deram uma maior solidez às bases da Teoria Quântica dos Campos.

Grande impulso nas teorias de gauge decorreu de estudos na rede possibilitando a análise de sua estrutura de fases. Em particular foram estudados o mecanismo de Higgs e a quebra espontânea de simetria obtendo-se uma visão mais correta ainda que incompleta dos chamados pontos críticos das teorias não abelianas. Ainda nesse contexto de teorias de gauge, foram desenvolvidos trabalhos muito importantes sobre a questão do confinamento em teorias com simetria $U(1)$ em três e em quatro dimensões.

A área da Teoria Algébrica de Campos, também chamada de Teoria Axiomática de Campos, especialidade que se dedica ao estudo de propriedades gerais, não específicas, de teorias de campos locais e que apresenta um forte elo de ligação com áreas da matemática, apresentou vários desenvolvimentos importantes. Em particular mencionamos os trabalhos sobre localidade e estatística em teoria de campos vetoriais massivos e o estudo da conexão entre teoria de campos e as chamadas geometrias não comutativas, constituindo um assunto de pesquisa atual sobre as estruturas matemáticas existentes em certos modelos supersimétricos.

2.7. Considerações Finais

Todos os assuntos que acabamos de descrever tem sido objeto das investigações de vários físicos brasileiros. Além disso, nossa comunidade tem-se preocupado também com certos aspectos técnicos fundamentais. Citamos em particular os trabalhos aqui desenvolvidos sobre a quantização de teorias vinculadas que constituem contribuições relevantes para a formulação correta de i) teorias com férmions quirais como é o caso do modelo de Weinberg-Salam para as interações eletrofracas, ii) teorias bosônicas quirais que são blocos na construção da chamada corda heterótica, uma possível teoria unificada de todas as interações. Essas investigações trazem também uma luz nova ao problema da medida na integração funcional, uma ferramenta fundamental dos físicos teóricos.

Atualmente existem grupos ativos em muitas das nossas Universidades e Institutos de pesquisa, alguns com massa crítica razoável, outros ainda em processo de formação. É extremamente importante assegurar colaborações entre esses centros, quer diretamente mediante convênios, quer através de correio científico eletrônico.

A capacidade computacional dos centros desenvolvidos deve ser aprimorada com a aquisição de computadores de grande porte visando especificamente o ataque de problemas inacessíveis ao cálculo tradicional. Como mencionamos anteriormente, entre esses problemas situa-se a descrição correta da física de baixas energias contida na QCD e a possível nova fase da QED.

3. A FÍSICA DA RADIAÇÃO CÓSMICA

3.1. Interações de Altas Energias

Desde os tempos pioneiros de Hess no início do século, o estudo da radiação cósmica tem contribuído enormemente para o aprofundamento de nossos conhecimentos sobre a constituição da matéria. As pesquisas em radiação cósmica, aparentemente acadêmicas e à margem do grande salto tecnológico que então se prenunciava, tiveram consequências que mesmo seus mais entusiastas seguidores jamais haviam imaginado. Até meados da década de 40, a radiação cósmica era o único instrumental existente para o estudo das chamadas partículas elementares.

Com o desenvolvimento tecnológico do pós-guerra, no final da década de 40 começaram a ser construídos grandes aceleradores de partículas, como o Ciclotron de Berkeley. Entretanto, é notável que um dos mais sensacionais resultados dos físicos de raios cósmicos, a descoberta do méson π , tenha sido obtido quando o acelerador de Berkeley, que tinha condições de descobrir o pion, já estava funcionando há cerca de um ano! A partir da construção de aceleradores de partículas cada vez maiores tornou-se mais difícil a continuação das pesquisas em raios cósmicos da maneira artesanal como vinham sendo feitas até então. Para escapar da concorrência dos aceleradores era imperioso procurar energias sempre mais altas. Isso só poderia ser conseguido aumentando a área e a eficiência dos detetores. Começou então a era das grandes colaborações, que viabilizaram esse deslocamento para regiões de energia mais alta. No início da década de 60, a colaboração Brasil-Japão começou a expor câmaras de emulsão nuclear no Monte Chacaltaya. Na década de 70 surgiram a Colaboração Pamir (grupos

soviéticos e poloneses), a Colaboração Fuji (grupos japoneses), a Colaboração JACEE (grupos americanos e japoneses) a Colaboração Kampala (grupos chineses e japoneses), a Colaboração Concorde (grupos franceses e japoneses), a Colaboração Austrália-Japão e outras.

Entretanto, o desenvolvimento de aceleradores cada vez maiores tem continuado, provocado pelos mais diversos fatores, que vão desde os mais puros interesses científicos até a rivalidade entre as superpotências e ao lobby de indústrias à procura de encomenda em períodos de crise.

No caso específico da Colaboração Brasil-Japão (CBJ), algumas de suas descobertas mais importantes, como o scaling, a quebra do scaling para energias muito altas, grandes momentos transversais, etc., antecederam de vários anos os resultados obtidos nos custosos aceleradores.

Mostraremos a seguir alguns resultados recentes obtidos pela CBJ e que tem tido ampla repercussão na comunidade científica internacional.

i. Centauros. São eventos identificados pela CBJ pela primeira vez em 1972. Sua característica principal é a não existência de π^0 , o que sugere a produção múltipla de pares de bárions. Desde sua descoberta, várias tentativas foram feitas em aceleradores (por exemplo UAS e UA1 do SPS-CERN) e em outros grupos de raios cósmicos para sua detecção. Outros grupos de raios cósmicos não detetam eventos desse tipo ou porque não usam emulsões nucleares e conseqüentemente não tem resolução angular suficiente, ou porque usam câmaras muito finas e conseqüentemente não podem seguir os hádrons dentro do detetor. A exceção é Pamir que já detetou Centauros. Nos próximos anos o grupo da CBJ pretende obter mais dados sobre Centauros, principalmente: distribuição de P_T , energia em repouso do estado intermediário, seção de choque e multiplicidade.

ii. Mini Centauros. São eventos onde também não há produção de π^0 . Seu P_T Médio é da ordem de 1 a 2 GeV, como nos Centauros, mas sua multiplicidade é pelo menos 5 vezes menor. Esse tipo de evento já foi observado pelas Colorações Pamir e Fuji.

A não detecção de Mini Centauros e Geminions em aceleradores, além de estar relacionada com questões de limiar e de eficiência de detecção, parece indicar a existência de relações genéticas entre os vários tipos de eventos exóticos, assunto que discutiremos adiante.

iii. Chirons e Geminions. São eventos onde também não se detetam π^0 , mas o P_T médio é da ordem de 5 a 10 GeV. As interações Geminions se distinguem por terem apenas 2 hádrons produzidos na interação principal. Esses eventos foram observados apenas por grupos de raios cósmicos (Pamir, Fuji e Chacaltaya). Os aceleradores tem energia suficiente para detetar os Geminions (massa em repouso $\sim 50 \text{ GeV}/c^2$), mas não os Chirons (massa em repouso \sim centenas de GeV/c^2). A nova geração de aceleradores terá energia suficiente para detetar os Chirons, mas para eventos Geminions as câmaras de Chacaltaya continuam sendo a única fonte de informações, pois a região de observação privilegiada é ocupada pelo feixe, no caso dos aceleradores.

iv. Mini-Clusters (MC). Esse tipo de fenômeno é observado pela CBJ e outros grupos em interações Chiron e Geminions.

Aparentemente, numa interação tipo Chiron ou Geminion é produzida uma partícula que posteriormente interage na atmosfera, dando origem aos Mini-Clusters. Aparecem nas chapas como grupos muito colimados (0,1 mm de raio) de cascatas eletromagnéticas e o P_T de seus constituintes é de 10 a 20 MeV. Conforme dados até agora obtidos, as partículas produzidas em interações Chiron e Geminion tem apresentado um livre caminho médio significativamente menor que o livre caminho médio de interação dos hádrons (da ordem de metade).

Mesmo que os próximos aceleradores (até 1995) consigam detetar Chirons, dificilmente haveria condições para detetar o resultado das interações dos secundários produzidos nas interações Chiron ou Geminion.

Conclusão

a. À parte as considerações até aqui feitas sobre os limiares de detecção para os vários tipos de novos fenômenos descobertos em raios cósmicos, deve-se salientar que é difícil, em aceleradores tipo feixes colidentes, efetuar medidas na região extremamente para a frente. Na radiação cósmica, é justamente essa região que permite medidas mais consistentes.

b. outro ponto interessante na radiação cósmica, é a possibilidade que temos de estudar também as interações de alta energia dos secundários. Isso não é possível em máquinas com feixes partículas-antipartículas. Tem sido justamente nas interações dos secundários de alta energia que temos observado alguns dos eventos exóticos, como os Mini-Clusters.

c. Recentemente, tanto a CBJ como outros grupos tem se dedicado a uma análise detalhada das possíveis relações genéticas entre os eventos exóticos, na tentativa de verificar se a informação do "exotismo" do evento se mantém nas interações dos secundários. Dados preliminares parecem sugerir a existência de uma correlação entre esses vários eventos. Esta área continuará sendo extremamente competitiva na próxima década, pois além de estarmos na faixa de energia primária da ordem de 10^{16} eV, os aceleradores projetados para os anos 90 continuarão com dificuldades para estudar as interações de alta energia dos secundários.

d. Alguns eventos exóticos não foram detetados no SPPS talvez por causa do limiar de detecção, e também talvez devido a problemas com a eficiência de detecção. Entretanto, se esses tipos de eventos não forem observados nos próximos aceleradores (p-p) poderemos concluir que eles não são resultado de interações p-p mas sim de primários pesados. Outra possibilidade é que esses eventos exóticos sejam resultado da interação de alguns secundários produzidos em uma primeira interação exótica no topo da atmosfera. Isso indica que as pesquisas em partículas elementares usando a radiação cósmica deverão continuar sendo competitivas pelo menos até a próxima década.

O problema nesta área, entretanto, continua sendo o detetor. Devido ao baixo fluxo incidente, é necessário um detetor com menos ~ 100 metros quadrados. Câmaras de emulsões com essa área requerem um aumento na automação dos processos de busca e análise dos eventos, sendo isso um investimento prioritário para esses grupos.

e. A possível identificação de fontes de raios cósmicos poderá ter grande impacto sobre a física das partículas elementares, e esse impacto é dramaticamente multiplicado pela crescente indistinguibilidade entre aquela e a Cosmologia. Pela primeira vez na história da física de raios cósmicos é possível estabelecer vínculos sobre o "feixe" dos projéteis para o estudo de suas interações com partículas-alvo, sejam estas controladas em laboratório ou não. Essa vantagem é mais acentuada no caso dos primários sem carga elétrica, o que evita a degradação do feixe pelos campos eletromagnéticos macroscópicos que permeiam o meio interestelar. Fótons gama tem seu espectro energético já estabelecido experimentalmente até 10^{17} eV, enquanto que o esperado SSC atingirá, em data ainda incerta, aproximadamente 10^{13} eV no centro de massa para colisões próton-próton.

3.2. Astrofísica de Altas Energias

Nos últimos anos tem se notado uma clara tendência na comunidade científica internacional para usar a radiação cósmica como sonda para se estudar a evolução de objetos estelares. Na região de energia acima de 10^{16} eV essa sonda pode fornecer informações únicas sobre processos nucleares que ocorrem no interior desses objetos. A criatividade dos físicos de raios cósmicos permitiu nesses últimos anos o desenvolvimento de detectores mais eficientes e muito mais simples, o que facilita o seu uso em larga escala em locais inóspitos (interior de minas, alta montanha, regiões polares e desertos). Por outro lado, como a região do espectro acima de 10^{16} eV é a única fonte de informações para a astrofísica de altas energias, o uso da radiação cósmica nessa área continua sem outros competidores.

3.3. Efeitos Locais

As primeiras características da radiação cósmica a serem estudadas foram a sua variação temporal e sua dependência geográfica. Atualmente esse estudo é feito com detectores instalados a bordo de balões estratosféricos e de satélites, pois a modulação solar e os efeitos geomagnéticos são mais eficientes na região de energia abaixo de alguns MeV. A modulação solar é causada pela atividade do sol e afeta as partículas de energia mais baixa, influenciando na injeção de partículas nas camadas de radiação que envolvem a terra. Efeitos geomagnéticos, causados por variações ainda pouco conhecidas do campo magnético terrestre, afetam também as partículas de energia mais baixa. A existência de uma anomalia magnética na região Sul do Brasil, descoberta pelo Sputnik 2 soviético em 1958, modifica a rigidez de corte, tornando esta região um local único para se estudar os mecanismos de injeção de partículas nas camadas de radiação. Já existe um grupo no País (UNICAMP) que realiza medidas sistemáticas nessa região, à procura de correlações entre as variações no fluxo da radiação cósmica e a atividade solar ou as alterações no campo magnético terrestre. Esse mesmo grupo da UNICAMP estuda também a possível correlação entre a variação da camada de ozônio e o aumento do fluxo de partículas carregadas causado pela atividade solar.

Há a necessidade, por exemplo, de se construírem detectores pequenos, leves, de grande eficiência e de alta resolução para serem instalados a bordo de balões e satélites. A insensibilidade das agências financiadoras não tem permitido um maior desenvolvimento dessa área no Brasil.

3.4. Astronomia Gama

Ainda na década de 50, desabrocharam importantes experimentos explorando o fenômeno dos chamados Chuveiros Atmosféricos Extensos, descobertos e estudados por Auger e alguns colaboradores nos anos 30. Auger usou contadores Geiger-Muller para determinar a existência de pulsos elétricos muito curtos produzidos pela chegada de grande número de partículas aparentemente criadas pela interação de um fóton gama de alta energia na alta atmosfera. Auger pode ainda determinar que elétrons e uma outra radiação, mais penetrante, formavam o fenômeno detectado. A radiação penetrante foi mais tarde identificada com o múons. Os experimentos de Auger estabeleceram ainda *que tais eventos implicavam em energias de até 10^{15} eV e mais.*

No final da década de 60 satélites militares norte-americanos detectaram bruscos e violentos transientes de radiação gama cujas fontes não estavam na Terra. Satélites mais especializados puderam em seguida descobrir fontes localizadas de raios X e gama na Via Lactea e em outras galáxias. Métodos observacionais usados em radioastronomia puderam ser aplicados, *tal como a análise de fases, e a melhora na relação sinal/ruído* daí resultante foi crucial para a identificação de muitas fontes. Novos satélites com utilidade vastamente melhorada continuam sendo lançados e projetados, tal como o Gamma Ray Observatory (GRO).

O espectro de energias da radiação cósmica tem em geral a forma $I(> E) = K.E^{-\gamma}$, assumindo o índice γ o valor aproximado 1 para o caso dos gamas e 1.7 para os núcleos ionizados. O tamanho do alvo oferecido pelos satélites significa, na prática, que dados utilizáveis são coletados somente em energias abaixo de um valor limite de aproximadamente 1 GeV por fóton gama. Chuveiros Atmosféricos Extensos, iniciados por primários carregados ao penetrar a atmosfera, e Cascatas Eletromagnéticas, iniciadas analogamente por fótons gama, se forem detectados ao nível do mar, requerem uma energia primária mínima de 10^{14} eV, mas cobrem tipicamente uma área da ordem de 10^3m^2 ou mais. Isso significa que a detecção da radiação cósmica por esse meio indireto acarreta simultaneamente uma subida dramática na escala das energias primárias e a possibilidade de coleta de dados em quantidades compatíveis com os métodos de análise necessários.

O advento assim inevitável da Astronomia Gama e da Astronomia de Altas Energias, em geral, veio colocar a física da Radiação Cósmica em patamares extraordinários tanto no uso dos Raios Cósmicos para o estudo da física das partículas em energias ultra-altas como no seu uso como os únicos portadores conhecidos de

informação cosmológica e astrofísica em que os quanta individuais possuem energias ultra-altas.

A Astronomia Gama ajudou a estabelecer, entre outras coisas, que os gamas são provavelmente originários de outras interações de partículas muito mais energéticas, tendo as interações ocorrido em geral na vizinhança da fonte. Investiga-se no momento a forte possibilidade de que essas partículas ancestrais dos gamas sejam as mesmas responsáveis pelos Chuveiros Atmosféricos Gigantes, cuja investigação levou a estabelecer experimentalmente o espectro primário até 10^{20} eV. O uso dessas partículas providas de carga, como portadoras de informação na astronomia de Altas Energias, é ainda problemático, pois a massa finita acarreta variações de velocidade que exigirão métodos especiais para o posicionamento da fonte.

Ao mesmo tempo que se investigam os métodos necessários para se avançar nessa direção, estendendo o controle do "feixe" até limites ainda pouco claros, os dados já coletados em Astronomia Gama mostram que tais fótons são originados em processos envolvendo densidades de energia compatíveis com tempos cósmicos extremamente reduzidos, nas escalas do Modelo Cosmológico Padrão, e muitas ordens de grandeza acima do atingível com máquinas aceleradoras concebíveis com tecnologias visíveis no horizonte. Este fato põe a Astrofísica e a Astronomia de Altas Energias num papel essencial para o desenvolvimento tanto da Física das Partículas Elementares com para o da Cosmologia, ao mesmo tempo em que todas essas áreas mostram tendências crescentes de fusão.

A detecção dessas partículas, com ou sem massa e carga elétrica, pressupõe técnicas capazes de coletar dados em quantidade suficiente na região de energia ultra alta do espectro. O traço comum entre essas técnicas é o fato de serem baseadas em experimentos realizados dentro da atmosfera terrestre, tirando assim vantagem do grande parâmetro de impacto dos Chuveiros Atmosféricos Extensos e das Cascatas Eletromagnéticas induzidos por primários da radiação cósmica.

Uma CEM é produzida quando uma gama interage com o campo elétrico de um núcleo da atmosfera, produzindo um par $e^+ e^-$ o qual dará início a um processo de cascata em que fótons e elétrons se multiplicarão até que a energia média dos mesmos decresça a valores que favorecem a absorção em lugar da multiplicação. As partículas da CEM poderão ser detetadas a uma certa profundidade atmosférica se o primário tiver energia suficiente para levar o desenvolvimento detetável da CEM até aquela profundidade. Ao nível do mar, o limiar é de aproximadamente 10^{14} eV para eventos verticais.

Um CAE é produzido quando um núcleo ionizado (mais de 90% são núcleos de hidrogênio) primário colide com um núcleo da atmosfera. Nessa colisão, nem todos os processos são conhecidos. Em certas condições haverá fragmentação nuclear e em todos os casos haverá produção múltipla de hádrons, dada a inelasticidade dessa colisão e das secundárias subsequentes. A energia elevada do primário fará com que muitas gerações sucessivas de hádrons continuem induzindo produção múltipla, e o fenômeno daí resultante é uma cascata hadrônica extremamente colimada que cobrirá apenas alguns metros quadrados ao atingir o nível do mar. Ao longo do desenvolvimento longitudinal de toda a cascata hadrônica, partículas com altíssimas energias (essencialmente pions neutros) decaem em dois fótons gama. Estes iniciarão CEMS que se desenvolverão se superpondo umas às outras, e o evento CAE poderá ser detectado de forma semelhante à CEM.

Dois parâmetros estimáveis experimentalmente e tratáveis teoricamente podem ter seus valores numéricos utilizados para distinguir entre CAE e CEM. O primeiro é o número de múons, dado que estes serão abundantemente produzidos ao longo da cascata hadrônica via decaimento de pions carregados, enquanto que sua presença nas CEM é escassa, sendo produzidos somente via fotoprodução de pions. O segundo é o parâmetro "idade" do evento. Este entra na parametrização das soluções das equações diferenciais descrevendo o desenvolvimento de CAEs e CEMs, descrevendo a rapidez com que um evento entra na região de decrescimento no número de partículas, envelhecendo. Um CAE, gerando CEMs até baixa atmosfera, evidentemente envelhecerá mais lentamente. Estes dois parâmetros tem grande uso na discriminação de gamas cósmicos dos outros primários, assim melhorando a relação sinal/ruído em Astronomia Gama.

O método clássico para a detecção desses dois tipos de eventos é a disposição regular de detectores/contadores de partículas de forma a coletar amostragens da densidade de partículas em coincidência. Os detectores, além de permitir a reconstrução da função de distribuição radial das densidades de partículas, podem ter seus sinais usados para medidas de tempos de voo entre diferentes detectores. É possível assim determinar a energia do primário, seu caráter (fóton ou íon), e a direção de chegada do primário, coincidente com a direção do eixo do evento. Este último, crucial para o trabalho astronômico, pode ser melhorado até as vizinhanças de 1 grau de resolução para os ângulos zenital e azimutal.

Outro método é baseado na coleção dos fótons Cerenkov produzidos pelas partículas ultrarelativísticas dos eventos. Como esses fótons são colimados até aproximadamente 2 graus do eixo do evento, o detector deverá ser direcional. Este último

fato introduz tanto melhoras na relação sinal/ruído quanto redução da eficiência dos experimentos. O primeiro fato se deve ao acompanhamento sistemático de uma fonte em perspectiva e uma resolução angular que pode ser melhorada até aproximadamente 1/3 de grau, o segundo se deve à exclusividade de noites sem lua para operação.

Técnicas mistas são possíveis, coletando, por exemplo, fótons em vários pontos diferentes e usando tempo de voo, ou usando detectores que discriminam fótons Cerenkov de outros.

A técnica do tempo de voo é herdeira direta dos grandes experimentos tradicionais usados desde os anos 50 para o estudo dos eventos gigantes. Virtualmente todos esses experimentos foram ou estão sendo readaptados para Astronomia Gama, o que significa basicamente melhorar a resolução angular e estabelecer o tempo padrão, essencial para todas as astronomias. Entre as adaptações bem sucedidas estão Haverah Park (Inglaterra), Buckland Park (Austrália), Akeno (Japão) e Yakutsk (URSS). Experimentos novos foram construídos como Los Alamos (EUA), Black Birch Mountain (Nova Zelândia) e Polo Sul (Inglaterra e EEUU). Outros continuam sendo montados, incluindo um no Brasil (UNICAMP).

A técnica de Cerenkov Atmosférico vem sendo extensamente usada por muitos novos grupos de pesquisa. Dada a inadequação astronômica inicial da técnica dos detectores acoplados por tempo de voo, grande parte dos melhores resultados em Astronomia Gama foram obtidos com Cerenkov. Estes experimentos continuam em operação, ao mesmo tempo em que muitos outros são projetados e construídos, incluindo pelo menos um no Brasil.

É visível hoje uma tendência para acoplar novos desenvolvimentos em tecnologia de detectores com o uso de diferentes técnicas experimentais. Um exemplo extraordinário disso é o experimento Fly's Eye (EUA) em que, além do Cerenkov Atmosférico, usa-se cintilação do N_2 atmosférico (isotrópica) induzida pelas partículas carregadas do evento. Está em progresso a instalação acoplada de um moderno e eficiente sistema de cintiladores sólidos para tempo de voo. É possível ainda discernir a viabilidade e a necessidade de se acoplar a tais sistemas experimentos subterrâneos, o que já vem sendo feito em alguns casos, como Gran Sasso (Itália). O laboratório do Gran Sasso, que conta com participação de um grupo brasileiro (UNICAMP), é o primeiro complexo de raios cósmicos a ser instalado no planeta, contando com detectores de gamas, monopolos magnéticos, de próton, neutrinos solares e astrofísicos, todos usando o mesmo padrão de tempo, com a coincidência temporal entre os vários detectores feita por software.

3.5. Impacto Tecnológico

Há uma tendência clara na área de raios cósmicos para a utilização de técnicas experimentais usadas na área de altas energias. Isso é uma consequência da fusão crescente dos assuntos tratados pelas duas áreas, tendendo a acentuar-se com o tempo.

Depois da bem sucedida experiência da criação do CERN, os governos dos países capitalistas desenvolvidos perceberam as profundas implicações tecnológicas dos grandes projetos da chamada pesquisa pura. A necessidade de se construir novas máquinas aceleradoras e de se desenvolver a necessária instrumentação de medida lançava novos e constantes desafios à tecnologia desses países. Financiamentos nessa área passaram a ser vistos não mais como a fundo perdido, mas como parte importante da política de desenvolvimento de novas tecnologias, necessárias aos interesses políticos e militares do bloco ocidental.

Sistemas de detecção baseados em grande multiplicidade de canais tendem a ser implantados com frequência crescente em pesquisas de raios cósmicos e partículas elementares. Grande parte desses canais é usada para processamento de sinais com a máxima rapidez que a tecnologia permite, pois é preciso, por um lado, armazenar vastas quantidades de dados em tempos muito curtos e, por outro lado, a capacidade dos circuitos para processar com rapidez e fidelidade nas faixas de alta frequência do espectro tem um impacto direto na resolução com que se poderá medir diversos parâmetros cruciais.

As características apontadas acima fazem parte da disciplina vagamente conhecida pelo nome de circuitos rápidos, e são a base para o desenvolvimento do hardware que torna possível a próxima geração de computadores. Os mais importantes projetos de processadores paralelos tiveram origem em laboratórios engajados em pesquisas de altas energias, como o ACP, desenvolvido no FERMILAB, o o APE, em desenvolvimento no INFN italiano. Esses laboratórios deram origem igualmente a novos padrões de instrumentação que mais tarde difundiram-se pela indústria do mundo industrializado, como o CAMAC e o FASTBUS. É notável que esses laboratórios tenham dado origem não somente a essas tecnologias, mas também às companhias que as difundiram.

Estudos realizados no CERN recentemente por um comitê empresarial europeu concluíram que, para cada unidade monetária investida naquele Centro, quatro foram produzidas como retorno tecnológico para a economia européia.

Ao mesmo tempo em que se observa o uso crescente dessas técnicas experimentais em pesquisas de raios cósmicos e partículas, observa-se um grande aumento do investimento mundial nessa área. Isso não é de surpreender, dada a insuficiência dos investimentos anteriores e o retorno científico constatado.

No caso brasileiro, abrem-se perspectivas bastante promissoras para a introdução em escala no país dessas tecnologias de processamento avançado de sinais para uso industrial generalizado. Seu veículo natural aparente serão os laboratórios envolvidos em pesquisa fundamental, na área de raios cósmicos e partículas elementares. O impacto na economia é impossível de se avaliar, mas certamente grande. Para o Brasil, isso não significaria simplesmente avanço tecnológico, mas a transição qualitativa para outro patamar de desenvolvimento industrial. No momento em que se estabelece em escala mundial uma nova divisão internacional do trabalho, a absorção e a criação de tais tecnologias no País poderá significar a diferença entre um futuro moderno e a estagnação.

É interessante observar que a evolução da física no Brasil, desde os tempos pioneiros de Wataghin, Souza Santos e Schömborg, levou, nos últimos anos, a maioria dos grupos a se dedicar cada vez mais à pesquisa aplicada. Uma das razões para isso foi a deterioração salarial que favoreceu o desenvolvimento de grupos que através de projetos específicos conseguiam financiamento para complementações salariais. Durante o assim chamado milagre econômico, as condições políticas do país faziam com que os jovens pesquisadores se sentissem cada vez mais atraídos para a pesquisa aplicada, apresentada como a panacéia para os males do subdesenvolvimento. A opinião oficial de então apresentava os centros de pesquisa aplicada como capazes de, em poucos anos, permitir ao país um decisivo salto tecnológico. Isso fez diminuir a procura por grupos que trabalhavam na chamada pesquisa pura e instaurava-se o círculo vicioso: com poucos alunos, pouco financiamento e, com pouco financiamento, poucos alunos. Os programas de pós-graduação exigiam teses em 2 anos (mestrado) ou 4 anos (doutorado), prazos impossíveis para a área de raios cósmicos e partículas elementares. Hoje, a mais de uma década daqueles anos de simplificação indevida, com uma enorme dívida externa causada em boa parte por projetos insuficientemente analisados, começa-se a tomar consciência da importância fundamental da pesquisa básica para o desenvolvimento tecnológico do país. Tais atividades tem despertado interesse cada vez maior entre os alunos. Continuamos, porém, a sentir em algumas agências financiadoras nacionais um certo descompasso. As pesquisas que fazemos não são um luxo em um país subdesenvolvido como o nosso. Conscientizar as lideranças políticas da importância da pesquisa básica é um imperativo estratégico para o Brasil.

3.6. A Próxima Década

A multiplicidade e a variedade de novos projetos e propostas para a investigação experimental em Raios Cósmicos e partículas elementares indica claramente que caminhamos para modificações qualitativas nas concepções de experimentos.

Idealmente, um experimento deveria permitir 100% de controle da região do espaço-tempo, por parte do experimentador, onde se desenvolve o fenômeno estudado. Sabidamente isso é inatingível. É possível, entretanto, avançar nessa direção, e são dois os fatores limitantes que condicionam o avanço possível. O primeiro é o investimento necessário, e o segundo a nossa capacidade de coletar, processar, armazenar e analisar quantidades crescentes de informação bruta.

O segundo fator, mais que o primeiro, tem sido o grande inibidor. A necessidade de maior controle é parte da explicação da conveniência do uso dos aceleradores para o estudo da estrutura da matéria. É claramente mais fácil controlar e conhecer alguns metros cúbicos de detectores envolvendo a região "quente" da colisão do que controlar quilômetros ou parsecs cúbicos, tipicamente, contendo processos no interior da atmosfera terrestre ou no espaço interestelar.

Entretanto, o desenvolvimento da informática vem precisamente diminuir a distância, em termos de viabilidade, entre esses dois tipos de experimento, e é isso que torna possível a multiplicação de novos projetos apontada acima.

Temos assim que o próprio desenvolvimento acadêmico das pesquisas nessas áreas aponta novos rumos, e o desenvolvimento tecnológico delinea os rumos possíveis. É notável, entretanto, que a tecnologia em questão é em geral criada e desenvolvida a partir dos próprios laboratórios de pesquisa fundamental.

Assistimos no presente a uma tendência clara para integração de projetos que utilizem técnicas diferentes, técnicas estas que ainda são quase sempre usadas isoladamente em experimentos diferentes. Já é possível apontar exemplos de experimentos que usam simultaneamente a técnica do Cerenkov atmosférico e a do tempo de voo com cintiladores. Experimentos para detecção de CAE dentro da atmosfera já são acoplados com laboratórios subterrâneos para detecção de múons e neutrinos, e não está provavelmente muito distante o uso simultâneo de satélites em conjunto com projetos desse tipo.

É evidente que o volume de dados que tais estudos originam é bastante extenso, e teria sido impossível sequer contemplar tal desenvolvimento sem os avanços tecnológicos necessários.

O Brasil possui tradição de pesquisa em partículas elementares e raios cósmicos, e reúne condições humanas e materiais para participar das tarefas investigativas decorrentes do avanço acelerado nas áreas das partículas elementares, da cosmologia, dos raios cósmicos e das altas energias.

A magnitude dessas tarefas, entretanto, exige cada vez mais que as grandes colaborações sejam favorecidas, devido à facilidade de mobilização de recursos humanos com treinamento adequado. Os grupos brasileiros na área reúnem todas as condições para participar de avançadas colaborações internacionais, mas é necessário que o desenvolvimento esperado da área no País não encontre impecilhos imprevistos, ou seja, deve-se dar à comunidade da área a oportunidade de planejamento consequente.

A tendência atual de se construir grandes aceleradores e de se montar verdadeiras "Estações de Raios Cósmicos", e não mais pequenos experimentos, permite antecipar para os anos 90 o papel fundamental que terão as grandes colaborações internacionais nessa área. Para que o País possa participar em pé de igualdade dessas colaborações e delas tirar o máximo proveito, se faz mister colocar o sistema nacional de C&T no século XX. O espírito e a visão dominantes impedem um planejamento científico a médio e a longo prazo e levam a soluções casuísticas, a decisões imediatistas, inviabilizando nossa participação em colaborações internacionais. Enquanto persistirem obstáculos quase intransponíveis para receber equipamentos doados, enquanto as corporações de empresários e o falso nacionalismo impedirem a importação de equipamentos científicos, não podemos ter ilusões de conseguir recuperar nossa capacidade de planejar, prever e concatenar passos futuros na direção do crescimento.

A nossa área de pesquisa, por englobar o que há de mais avançado tanto em ciências quanto em tecnologia é a mais sensível ao atraso da infraestrutura de financiamento, reflexo do que acontece no País como um todo. O que se prenuncia neste campo para a próxima década requererá de nossos governantes ousadia, coragem e visão para tomar novas decisões, que estarão muito além do padrão atual.

4. GRUPOS EXPERIMENTAIS: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS

Esta área é estudada no Brasil por 9 grupos experimentais:

CBPF: 02 Grupos de Física de Altas Energias (Aceleradores) e 01 Grupo de Raios Cósmicos

COPPE: 01 Grupo de Altas Energias (Aceleradores)

USP: 01 Grupo de Altas Energias (Aceleradores)

UFF: 01 Grupo de Raios Cósmicos

UNICAMP: 02 Grupos de Raios Cósmicos

UFPB: 01 Grupo de Raios Cósmicos

A Física de Altas Energias pode ser estudada através dos Raios Cósmicos, além dos Aceleradores, sendo que o Grupo da UFF, o do CBPF e um dos Grupos da UNICAMP se dedicam a isso, ou seja, estudam colisões hadrônicas em energias altas e ultra-altas.

O outro Grupo de Raios Cósmicos da UNICAMP dedica-se ao estudo de outros aspectos da radiação cósmica: Astrofísica de Altas Energias e Medidas dos secundários, ligadas a estudos Geofísicos, principalmente a Anomalia Magnética do Atlântico Sul. O Grupo de Raios Cósmicos da UFPB dedica-se à Astrofísica de Altas Energias.

O desenvolvimento, no Brasil, da pesquisa experimental na áreas cobertas pelos Grupos acima se fez e se faz num clima muito pouco favorável.

Embora os primórdios da Física no Brasil, nas décadas de 30 e 40, tenham se alimentado quase que exclusivamente nestas áreas, o primeiro ciclo (e o único, até agora) de financiamento razoável à pesquisa, nas décadas de 60 e 70, foi presidido por decisões tomadas em círculos colocados fora do alcance da discussão e da crítica da comunidade acadêmica. Disso resultou uma marginalização relativa dessas áreas em benefício de outras, especialmente a Física da Matéria Condensada, pesadamente financiada no período.

O início da crise presente afeta todas as áreas, sendo porém que o efeito disso sobre as áreas aqui discutidas fica potencializado pela fragilidade herdada das décadas de marginização.

Não obstante, a pesquisa nessas áreas cresceu e se diversificou de forma que chega a ser surpreendente. Os caminhos do crescimento e da produtividade encontrados tiram inspiração em parte das tendências internacionais e em parte de propostas e soluções locais.

A penetração de grupos brasileiros nas grandes colaborações trabalhando nos grandes aceleradores de partículas sinaliza mudanças que vão além do simples aumento da atividade da área no Brasil. A criação dos aceleradores na forma de Laboratórios Nacionais ou Multinacionais representa a entrada em cena de uma forma superior de organização das atividades de pesquisa. Racionalizam-se custos, multiplica-se o intercâmbio de pessoas e idéias, aumenta-se o fluxo de conhecimentos gerados e, importante, obtém-se um retorno tecnológico para a economia em geral que é desproporcional ao investimento global. Essa forma de organização é, até o momento, exclusiva das áreas ligadas à Física Experimental de Partículas, em todo o mundo. A penetração das vantagens disso no Brasil não se faz, evidentemente, sob a forma de fundação de Laboratórios similares, dadas as dificuldades de investimentos. Entretanto, o próprio desenvolvimento conjunto das áreas aqui tratadas leva à extensão dessas formas de organização em vários sentidos. Primeiro, a importância das colaborações internacionais está sendo assimilada rapidamente, com efeitos salutarés para a ciência no Brasil. Segundo, essa tendência se propaga para outras áreas, como a dos Raios Cósmiticos, motivada pelo próprio desenvolvimento recente dessas áreas, cada vez mais convergentes.

Alguns números expressivos podem ser analisados com base nos dados brasileiros. Aproximações são necessárias, principalmente devido às dificuldades em dar respostas precisas aos questionários da SBF, e também devido ao fato de que nem todos os grupos responderam aos mesmos.

Aproximadamente 30 doutores experimentais trabalham na área hoje, no Brasil. Desses, metade é formada na década de 70, e a outra metade na de 80, sendo residual o número dos formados antes. Isso indica crescimento vigoroso, principalmente se levarmos em conta a indigência relativa de financiamento nas décadas em questão. Menos de metade desses doutores tiveram formação no exterior, o que indica a não-incipiência da área, embora pequena ainda em recursos humanos.

Estão em formação, no momento, da ordem de uma dezena de novos doutores no Brasil, e outro tanto de Mestres, apontando para uma solidez na continuidade do crescimento.

Os diversos grupos, em conjunto, receberam aproximadamente 50 Professores Visitantes durante os anos de 1987 e 1988, quase todos experimentais vindos de outros países.

Há 6 linhas de pesquisa sendo presentemente atacadas por essa comunidade:

Física de Altas Energias com Aceleradores
Física de Altas Energias com Raios Cósmicos
Colisões de Íons Pesados (Radiação Cósmica Primária com Balões)
Astronomia Gama em Energias Altas e Ultra-Altas
Medidas de Secundários com Balões (Anomalia Magnética Sul)
Detetores Subterrâneos (Astronomia Neutrínica)

Os experimentos em operação e em construção são assistidos por aproximadamente 20 técnicos, número claramente insuficiente.

A produção científica, na forma de trabalhos submetidos a arbitragem e publicados, por essa comunidade, pode ser vista na tabela abaixo:

Período	Publicações Arbitradas	
	Revistas	Proceedings
1978-1982	24	60
1983-1987	40	132
1988	20	28

A produção é crescente, ficando em 1988 no índice de aproximadamente 1,5 trabalhos por doutor e por ano. Deve ser salientado aqui que a colocação dos Proceedings das Conferências Internacionais de Raios Cósmicos na coluna da direita subestima a produção, dado que esses proceedings são mais importantes que quaisquer periódicos, na área de Raios Cósmicos.

O patrimônio atual dos Grupos, na forma de equipamento já adquirido, pode ser orçado em aproximadamente US\$ 1,000,000.00 (Um milhão de dólares). As datas de aquisição desses equipamentos se distribuem mais ou menos uniformemente pelo espaço total de tempo abrangido na tabela acima, ou seja, de 1978 até 1988, com substancial

fração localizada na década de 60. Estes números, acoplados à tabela acima e incluindo a década de 60, nos dão aproximadamente US\$ 200,000.00 (duzentos mil dólares) por ano, um valor baixo por qualquer padrão.

A colaboração acadêmica internacional é unanimemente apontada por todos os Grupos como crucial. São mantidas atividades colaborativas com importantes instituições na Itália, URSS, Japão entre outras.

A comunidade da área vê dificuldades substanciais para o progresso e mesmo a manutenção das atividades no nível atual. São apontadas, entre outras, as principais dificuldades como sendo:

- improvisação forçada
- falta de pessoal científico e técnico
- fuga de estudantes devido à falta de financiamento
- pouca automação nas medidas
- falta de agilidade nas importações
- pesquisadores forçados a administrar a busca de fundos
- universidades administrativamente despreparadas
- carência quase absoluta de financiamento, mesmo dentro do quadro brasileiro, comparativamente

No entanto, mesmo arcando com as dificuldades acima, a comunidade planeja para o primeiro quinquênio da década de 90 a instalação de aproximadamente uma dezena de novas linhas de pesquisa ligadas à área. Deteta-se ainda que, caso as condições de financiamento se aproximem do considerado ideal, os números relativos ao segundo quinquênio aparecem idênticos aos do primeiro.

No aspecto financeiro, os experimentais da área estão pleiteando US\$ 2,000,000.00 (dois milhões de dólares) para o primeiro quinquênio da década de 90, e US\$ 2,500,000.00 (dois milhões e quinhentos mil dólares) para o segundo. Isso para consolidar, implantar e expandir o trabalho atualmente sendo realizado, e dentro das condições atuais de carência do sistema de C&T no Brasil.

Na eventualidade de se alcançar um estágio ideal, desafogado, no tocante ao financiamento à pesquisa no Brasil, a comunidade diagnostica que poderá utilizar com sucesso US\$ 7,000,000.00 (sete milhões de dólares) em cada um dos quinquênios da próxima década.

Mantidas as condições atuais, os grupos esperam formar mestres e doutores (M/D) em número de 18/8 no primeiro quinquênio e 20/12 no segundo. Isso no Brasil.

Nas condições ideais, os números aumentam para 34/12 e 44/24 respectivamente.

A absorção esperada de pessoal científico pelos Grupos também muda com a mudança das condições. Os números de (M/D) seriam 6/8 e 4/10 para os respectivos quinquênios, nas condições atuais, melhorando para 14/18 e 18/24 nas condições ideais.

Ainda se prevê que os Grupos poderão contribuir, na próxima década, com possíveis formas de colaboração com a indústria, principalmente no que toca à automação de controles e processos. Isso é um indício de que essa colaboração, comum nos países industrializados nessa área, começa a aparecer no Brasil.

RECOMENDAÇÕES

Estas podem ser divididas em dois grupos, ou seja, aquelas originadas no combate às dificuldades presentes e aquelas originadas na avaliação dos rumos futuros da ciência.

No primeiro grupo, espera-se que seja restaurada ou, para os grupos mais novos, criada, a capacidade de planejamento plurianual. A quase totalidade das dificuldades enfrentadas hoje tem aí suas raízes. Dotações de bolsas, fundos para pesquisa, quotas de importação de equipamentos são itens que devem ser atacados à luz das peculiaridades e da natureza da atividade científica. O fato de que a maior parte do sistema acadêmico de pesquisa no Brasil está umbilicalmente ligado ao serviço público não pode significar uma aplicação linear das regras e salvaguardas prevalentes nesse serviço sobre as atividades de pesquisa. Soluções criativas deverão ser encontradas, e isso só será possível primeiro com a vontade política das autoridades no poder e, segundo, com uma participação intensa da comunidade científica na busca dessas soluções.

No segundo grupo, estão as questões ligadas à agilização da produção científica. Nesta área, isso passa necessariamente pelo aumento das áreas de contato dos Grupos entre si e com Grupos mais avançados no exterior, ou seja, pelo favorecimento da participação dos Grupos brasileiros em grandes colaborações internacionais. O progresso é assim facilitado, com impacto não só na produção científica, mas também na contribuição tecnológica. Um dos pontos de estrangulamento mais graves que enfrentamos hoje, nesse aspecto, está no item viagens. Pesquisadores, estudantes e técnicos precisam de maiores facilidades para viajar, aproximando nosso padrão dos

internacionais. O impacto do intercâmbio sobre os resultados é desproporcional ao investimento.

Ainda no segundo grupo, surge como item de extraordinária importância individual a necessidade inadiável de uma política concreta e agressiva para a implantação de Laboratórios Associados. Embora sua implantação em outras áreas da Física, no Brasil, tenha advindo principalmente da identificação de instituições de excelência, nesta área a necessidade está profundamente ligada à própria natureza do trabalho experimental desenvolvido. A astronomia neutrônica, por exemplo, requer instalações vastas e especializadas. Os custos e a produção científica somente serão otimizados com laboratórios associados que permitam o trabalho partilhado por diversos grupos nacionais e estrangeiros.

5. DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

Existem hoje cerca de 220 físicos, entre mestres e doutores, com vínculo empregatício, trabalhando na área de Física de Partículas e Campos. Este número, se comparado com o mesmo número apresentado no último levantamento feito pela SBF, no documento A Física no Brasil, apresenta uma redução, uma vez que nele se incluem apenas os pesquisadores com atividade na área, em sentido estrito.

Um rápido exame da Tabela 1 evidencia uma disparidade muito grande entre o número de pesquisadores em aspectos puramente teóricos e aqueles com atividade ou experimental, ou com trabalho teórico, ligado a fenomenologia. Mais da metade dos físicos são teóricos e os experimentais constituem pouco menos de 13% do total.

Ainda na Tabela 1, vê-se que o número de estudantes de pós-graduação, corresponde a uma média de pouco mais de um estudante por doutor.

5.1. Linhas de Pesquisa: Distribuição de Pessoal

A Tabela 2 mostra a distribuição de 200 pesquisadores entre as diversas linhas de pesquisa, com seus respectivos Índices PACS.

É posta em evidência mais uma vez a disparidade atualmente existente entre a atividade teórica e a experimental, ainda que nesta última incluamos os

fenômenologistas. Notória também a escassez de recursos humanos em Instrumentação para Física de Partículas e áreas correlatas, o que impede qualquer participação mais ambiciosa de grupos brasileiros em projetos de algum porte.

5.2. Formação de Pessoal

No País

A Figura 1 mostra o número de mestres e doutores formados por ano, desde 1981. Nota-se uma recuperação nos dois últimos anos, após uma queda abrupta em 1986.

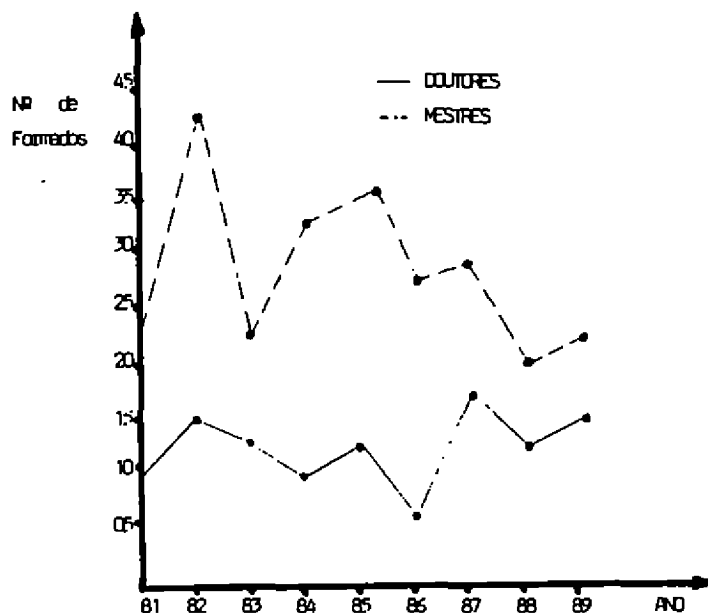


Fig.1 - Recursos Humanos Formados em Física de Partículas e Subáreas Correlatas

No Exterior

Desde o último levantamento feito pela SBF, caiu consideravelmente o número de bolsistas brasileiros no exterior, em programas de doutoramento. De 27 questionários respondidos, temos a seguinte distribuição:

- 9 doutorandos no exterior, sendo 2 com emprego no Brasil e os demais sem emprego. Os bolsistas em teoria são 7 e em experimental 2.

- 18 pós-doutores no exterior sendo 11 com emprego no Brasil e 7 sem emprego. Dos pós-doutores no exterior, apenas 2 estão em física experimental, os restantes 16 estão em áreas teóricas.

5.3. Produção Científica

A tabela 3 mostra o número de artigos científicos publicados em revistas de circulação internacional ou em atas de conferências internacionais, de acordo com a sub-área, nos anos de 1985 e 1986.

6. RECOMENDAÇÕES RELATIVAS A FÍSICA DE PARTÍCULAS E CAMPOS

Estimamos que hoje, o total de equipamentos de que dispõem os físicos de partículas, distribuídos nacionalmente, não chegue a US\$ 6,000,000.00 (seis milhões de dólares), não levando em consideração, é claro, as facilidades centralizadas de computação, que na verdade não são dedicadas a uma só área da física.

A entrada de grupos brasileiros em colaborações internacionais, realizando experiências em laboratórios como Fermilab e Cern, vem de imediato colocar a necessidade de uma aceleração na formação de pessoal, tanto científico como técnico e mais importante ainda, apresenta à comunidade o desafio de ser capaz de desenvolver no Brasil, equipamentos (detectores, sistemas de aquisição de dados) que possam ser utilizados, de maneira confiável e com vantagens, nas experiências realizadas nos grandes aceleradores no exterior.

Tendo em vista o tamanho dos grupos experimentais hoje existentes no País, coloca-se como prioritária a formação de recursos humanos e um apoio material que incentive as iniciativas de construção de equipamentos no Brasil, estimulando a interação com a indústria brasileira. Pode-se estimar que um investimento da ordem de 10 milhões de dólares nos próximos 5 anos teria o efeito de consolidar os grupos ora existentes e permitir uma mudança de qualidade nas pesquisas realizadas nesta área.

Recomendações às Agências de Fomento

a) Formação de Pessoal

Especial atenção é requerida na formação de pessoal científico e técnico, na área experimental. Deve-se fortalecer os programas de bolsas tipo "sanduiche" para estudantes de doutoramento.

É necessária também a criação, por parte das agências de fomento, de programas especiais de formação de técnicos qualificados na área de instrumentação e eletrônica, indispensáveis para o apoio das atividades de pesquisa dos grupos experimentais.

b) Recursos Computacionais

Sendo cada vez mais indispensável, tanto para a atividade teórica como para a atividade experimental, o uso intenso de computadores rápidos, recomenda-se às agências de fomento um programa especial de equipagem dos principais grupos de pesquisa na área, de sistemas de computação modernos e distribuídos, tipo estações de trabalho, as quais possam ser ligadas em uma rede de pesquisa.

c) Programas Especiais

Recomenda-se às agências de fomento o fortalecimento dos programas de colaboração internacional, com grandes laboratórios, como Cern e Fermilab, com a dotação de recursos aos mesmos, para que possam ser realmente efetivados.

Neste período em que é prioritária a formação de pessoal, recomenda-se o apoio às iniciativas de organização de "workshops" em instrumentação, escolas de verão, com participação de pesquisadores estrangeiros.

Recomendações à Comunidade

a) O surgimento de novas oportunidades de colaboração com diversos laboratórios, como Fermilab, Cern, Desy, UNK, Gran Sasso e outros, exige da comunidade um esforço de disciplina e autocrítica para que possa sempre ter em vista a sua real capacidade em assumir novos compromissos, levando em conta os escassos recursos humanos hoje disponíveis.

Prioridades de colaborações terão que ser estabelecidas através de critérios científicos e técnicos, exclusivamente.

b) A escassez de recursos materiais exige da comunidade uma política aberta de circulação de informação e equipamentos tais como módulos de eletrônica e detetores. É desejável também a realização de encontros breves a nível nacional nos quais seja possível a atualização da informação relativa a dos diversos grupos, como suas atividades internacionais, equipamentos de que dispõe, etc.

TABELA 1 - RECURSOS HUMANOS EM FÍSICA DE PARTÍCULAS E SUB-ÁREAS CORRELATAS (R)

INSTITUIÇÃO	DOCTORES	MESTRES	TEÓRICOS	EXPERIMENTAIS	TEÓRICOS FENÔMENO- LOGISTAS	ESTUDANTES DOUTORADO	ESTUDANTES MESTRADO
UFRGS	10	4	14	-	11	3	-
UE LONDRINA	2	6	8	-	8	-	1
USP-SP	16	-	14	2	5	27	15
USP-S. CARLOS	1	-	1	-	-	1	-
IFT-UNESP	13	-	13	-	3	16	16
UNICAMP	10	3	4	9	3	6	10
CTA	6	-	6	-	-	-	-
UFRJ	21	18	38	1	1	20	14
CBPF	29	4	22	11	7	26	11
PUC	11	-	10	1	6	-	2
OBS. NACIONAL	3	2	5	-	-	1	1
UERJ	1	2	3	-	1	-	-
UFF	6	7	11	2	4	3	3
UFES	3	-	3	-	-	-	-
UFMG	2	-	2	-	-	1	2
UNB	8	2	10	-	-	-	2
UFPB	9	6	14	1	-	-	4
UFPE	3	-	3	-	3	1	2
UFPA	1	-	1	-	-	-	-
UE MARINGÁ	2	2	4	-	4	-	-
TOTAL	157	56	186	27	55	105	83

(R) Dados até 1989

TABELA 2 - PESQUISADORES (+) POR SUB-AREA DE PESQUISA E POR INSTITUIÇÃO EM FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES E SUB-ÁREAS CORRELADAS

PACS	02 MÉTODOS MATEMÁTICOS	03 FÍSICA GERAL QUÂNTICA E CLÁSSICA	04 RELATIVIDADE E GRAVITAÇÃO	11 TEORIA DOS CAMPOS	12 TEORIA E MODELO P/ INTERAÇÕES	13 e 14 PROCESSOS ESPECÍFICOS E PROPRIEDADES DE PARTÍCULAS	29 MÉTODOS EXPERIMENTAIS E INSTRUMENTAÇÃO	94.40 RAIOS CÓSMICOS
INSTITUIÇÃO								
UFROG	-	-	-	5	8	1	-	-
UE LONDRINA	1	1	2	4	1	-	-	-
USP-SP	1	-	1	8	3	2	-	-
USP-S. CARLOS	-	-	1	-	-	-	-	-
IAG-USP	-	-	1	-	-	-	-	-
IFT-UNESP	2/1	-	6	5/1	6/1	1	-	-
UNICAMP	-	-	-	-	-	3	2	8
CTA	-	-	-	6	-	-	-	-
UFRJ	6	6	4	9/1	8	6	-	-
CBPF	1	4	4	9	1	8	5	2
PUC	1	-	-	5	3	2	-	-
OBS. NACIONAL	-	-	1	-	-	-	-	-
UERJ	1	-	1	-	1	-	-	-
UFF	-	1	-	1	1	2	-	3
UFES	-	-	3	-	-	-	-	-
UFMG	-	-	-	2	-	-	-	-
UNB	2	-	5	1	2	-	-	-
UFPB	1	-	5	8	-	-	-	1
UFPE	-	-	-	-	3	-	-	-
UFPA	-	1	-	-	-	-	-	-
TOTAL	16/1	13	34	63/2	38/1	25	7	14

(*) O segundo número indica o número de pós-doutores na instituição, sem vínculo de emprego

(*) Dados até 1989

TABELA 3 - NÚMERO DE PESQUISADORES E NÚMERO DE ARTIGOS PUBLICADOS (1985/86)

PACS	02 MÉTODOS MATEMÁTICOS	03 FÍSICA GERAL QUÂNTICA E CLÁSSICA	04 RELATIVIDADE E GRAVITAÇÃO	11 TEORIA DOS CAMPOS	12 TEORIA E MODELOS P/ INTERAÇÕES	13 + 14 PROCESSOS ESPECÍFICOS E PROPRIEDADES DE PARTÍCULAS	29 MÉTODOS EXPERIMENTAIS E INSTRUMENTAÇÃO	94.40 RAIOS CÓSMICOS
Nº DE FÍSICOS	7	8	26	57	28	23	2	14
TOTAL =	165							
Nº DE ARTIGOS	6	45	36	116	9	45	4	8
TOTAL =	269							

PROJETOS INTERDISCIPLINARES

I. INTRODUÇÃO

Este documento descreve os chamados grandes projetos, que na área da Física inclui laboratórios de custo acima de alguns milhões de dólares. A característica comum é que estes laboratórios deverão ser instalados no País durante os próximos 5 a 10 anos.

Estão descritos os seguintes Laboratórios:

1. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em fase de construção na cidade de Campinas - SP. O investimento neste projeto é de US\$ 10,000,000.00 (dez milhões de dólares) por ano, durante os próximos 6 a 8 anos.
2. Fábrica de Mésons. Em fase de anteprojeto. Estudo preliminar feito no CBPF-CNPq estima um custo total de US\$ 30,000,000.00 (trinta milhões de dólares).
3. Expansão do Acelerador Pelletron do IF-USP, São Paulo, estimada em US\$ 8,000,000.00 (oito milhões de dólares).
4. Expansão do Laboratório de Implantação Iônica do IF-UFRGS, mediante aquisição de um acelerador de 2 a 3 MV de energia. Custo estimado de investimento US\$ 4,000,000.00 (quatro milhões de dólares).

II. O LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON

1. ACELERADORES DE PARTÍCULAS: UMA VISÃO GERAL

O objetivo desta seção é fornecer um panorama geral da Física de Aceleradores, com ênfase especial nas fontes de luz síncrotron. Procuraremos abordar aspectos de interesse mais amplo, a fim de possibilitar aos especialistas de outras áreas e disciplinas uma visão adequada do campo.

1.1. Evolução dos Aceleradores

Em 1927, Rutherford, falando à Royal Society, expressou a sua esperança de que algum dia seriam desenvolvidos aceleradores capazes de jogar partículas contra o núcleo, vencer a barreira de repulsão coulombiana, e provocar a desintegração artificial.

Cinco anos mais tarde, Cockcroft e Walton, usando um acelerador eletrostático, desintegravam o núcleo do átomo de Li, com prótons acelerados a 500 kiloeletronVolts (keV). No mesmo ano, Lawrence e Livingstone aceleravam com um ciclotron, prótons até 1.2 megaeletronVolts (MeV). Os dois princípios básicos de aceleração de partículas estão representados nestas máquinas: a aceleração em uma só passagem pelo potencial acelerador, característica de aceleradores eletrostáticos, ou a aceleração ressonante, isto é, a múltipla passagem da partícula por um potencial acelerador.

No final da década de 30, com seu ciclotron de 60 polegadas, o grupo de Lawrence conseguia acelerar deuteronos até MeV. A Segunda Guerra Mundial interferiu com o desenvolvimento dos aceleradores. Porém, ao seu final, o campo explodiu, criando um novo estilo de fazer Ciência: a chamada "Big Science". Os dois desenvolvimentos conceituais e tecnológicos na área, com impacto duradouro, foram os aceleradores lineares (com uma pré-história desde 1925) e o síncrotron. O grupo de Stanford, liderado por Hansen, com o Linear Mark I, acelerou elétrons até 6 MeV em 1947. O grupo de Harwell, liderado por Lawson, atingia 70 MeV para as mesmas partículas, no mesmo ano.

Basicamente todos os desenvolvimentos posteriores de aceleradores, até hoje, são resultado das evoluções tecnológicas destes dois tipos de máquinas. Ambas utilizam o mesmo "motor", ondas eletromagnéticas de alta frequência, para acelerar os elétrons. Em aceleradores lineares, como o nome indica, as partículas viajam em linha reta, absorvendo progressivamente energia de uma onda eletromagnética. Esta se propaga em um guia de onda construído de tal forma que sua velocidade de fase seja igual à velocidade de luz, de tal forma a manter uma fase constante entre o campo elétrico longitudinal acelerante e a partícula acelerada. A vantagem do acelerador linear é que não há, praticamente, perda de energia por radiação eletromagnética. A energia final é proporcional ao comprimento da máquina, pois a partícula passa apenas uma vez pela estrutura aceleradora. O maior acelerador linear do mundo, o LINAC de 2 milhas de Stanford, acelera elétrons até 50 GeV.

No síncrotron, a partícula passa repetidas vezes por uma cavidade aceleradora contendo uma onda eletromagnética. Este é, portanto, um processo de aceleração ressonante. Para guiar as partículas dentro da câmara de vácuo, são necessários eletroímãs. Os campos magnéticos dos eletroímãs que guiam as partículas dentro dos arcos de círculo de sua trajetória são rampeados, de forma a manter constante a razão energia/campo, isto é, o raio geométrico de curvatura da trajetória. Além da aceleração longitudinal, dentro das cavidades de radiofrequência, a partícula é acelerada transversalmente à sua velocidade, pelos ímãs defletores. Este tipo de aceleração, como segue das equações de Maxwell, é muito eficiente para a produção de radiação

eletromagnética, especialmente por partículas altamente relativísticas. A desvantagem dos aceleradores circulares, do ponto de vista da Física de Partículas, está na perda indesejada de energia. A fim de evitá-la, as máquinas tendem a crescer de tamanho, como, por exemplo, o LEP do CERN, com mais de 27 quilômetros de circunferência, que acelerará elétrons a mais de 100 GeV.

A vantagem do acelerador ressonante sobre o linear é a possibilidade de acumular corrente, isto é, obter feixes bem mais intensos de partículas. Para explorá-la, foram desenvolvidos, na década de 60, os anéis de acumulação, síncrotrons onde a energia perdida por radiação é repostada em uma ou mais cavidades de radiofrequência. Estas máquinas são alimentadas por aceleradores de baixa corrente e a acumulação é o resultado da injeção de muitos pulsos de partículas aceleradas.

1.2. Pesquisas Pioneiras com Luz Síncrotron

A grande síntese de Maxwell (1895), unindo em um mesmo corpo teórico os fenômenos elétricos e magnéticos e descrevendo a origem dos fenômenos luminosos em termos de carga e correntes elétricas, forneceu aos físicos interessados em interpretar resultados espectroscópicos uma ferramenta poderosa. Das equações de Maxwell, sabemos que cargas elétricas aceleradas emitem radiação eletromagnética.

Larmor (1897) e logo depois Schott (1907) buscaram uma solução para o problema dos espectros atômicos, combinando Mecânica Clássica e Teoria Eletromagnética. Em particular, Schott desenvolveu a primeira teoria da radiação síncrotron, calculando a emissão de radiação por elétrons movendo-se em órbitas circulares. a conclusão de seu artigo de 1907, entretanto, é pessimista: a teoria não pode explicar os fenômenos observados.

Com a hipótese do átomo nuclear de Rutheford, seguida pela formulação revolucionária de Bohr (1913) do problema dos espectros atômicos, as teorias clássicas foram abandonadas. A radiação síncrotron desapareceria da física até a retomada do problema em 1938, por Pomeranchuk, em outro contexto: a Astrofísica. Na década de 40, Iwanenko, Pomeranchuk e Arzimovich (1944, 1945), na União Soviética, e Schwinger (1944, 1949), nos Estados Unidos, renovaram esses estudos, focalizando o interesse na radiação emitida por elétrons em aceleradores.

Como mencionamos acima, a emissão de radiação síncrotron é uma desvantagem dos aceleradores circulares, do ponto de vista da aceleração das partículas. Logo após as primeiras observações experimentais dessa radiação no síncrotron de 70MeV da General

Electric (1946), foram feitos estudos sobre as suas características físicas. Além dos estudos sistemáticos do grupo de Pollock, na General Electric, estudos mais aprofundados foram realizados por Corson (1952, 1953) e Hartmann e Tomboulion (1954, 1956) no síncrotron de 300 MeV da Universidade de Cornell.

Em 1956, Hartmann e Tomboulion publicaram um artigo que marca o início da espectroscopia utilizando o síncrotron como fonte de radiação de ultravioleta de vácuo e raios-X moles. Alguns anos mais tarde (1963), na Europa, o grupo de Yvette Cauchois utilizou o síncrotron de Frascati para estudos de espectroscopia atômica, abrindo uma área do espectro até então inexplorada: a faixa de 50 a 500 eV. Quase ao mesmo tempo, nos Estados Unidos, Madden e Codling usavam o síncrotron de 180 MeV do National Bureau of Standards para estudar a absorção por gases nobres.

1.3. Características das Fontes Síncrotron

A. Características Gerais

A luz síncrotron é emitida quando uma partícula relativística é acelerada transversalmente à sua velocidade. A radiação é emitida em um cone de abertura inversamente proporcional à energia da partícula, cujo eixo é definido por sua velocidade instantânea. O espectro contém harmônicos da frequência de revolução (tipicamente MHz) até ordens muito altas, com um pico em torno de q^3 , onde q é a razão entre a energia da partícula e sua energia de repouso. Para elétrons:

$$\gamma q = 1957 E(\text{GeV}),$$

onde $E(\text{GeV})$ é a energia expressa em Gigaelétron-Volts (10^9 eV). Nesta região, o espectro é praticamente contínuo. A radiação é linearmente polarizada no plano da órbita e adquire uma pequena polarização vertical quando observada fora do plano. A sua intensidade decai rapidamente nestas condições, pois o ângulo de abertura do cone acima referido é da ordem de $1/\gamma$.

A equação 1 mostra porquê apenas elétrons e pósitrons são normalmente utilizados para a produção de luz síncrotron: para prótons ($\gamma = 1,066 E(\text{GeV})$) a radiação emitida ocorre em uma faixa de pouco interesse.

Do ponto de vista do usuário, as características importantes da radiação produzida por um anel de armazenamento podem ser expressas pelas quantidades abaixo relacionadas.

O brilho espectral B , é definido pelo número de fótons produzidos por unidade de área no espaço de fase transversal e por unidade de largura de banda. As unidades usualmente utilizadas são mm^2mrad^2 e 0.1% ($\delta \epsilon / \epsilon$) para, respectivamente, a área e a largura de banda. Esta é a medida adequada da qualidade do feixe de fótons para experimentos que requerem uma pequena divergência angular e pequena área irradiada.

O brilho espectral é determinado pela emitância do feixe de partículas, definida como a área ocupada pelo feixe no espaço de fase transversal. Ela mede a seção reta e a abertura angular do feixe de partículas. Em um anel moderno, o objetivo é de obter uma emitância horizontal de poucas dezenas de m.mrad (10^{-9}mrad) a 1 GeV. A emitância vertical é, no mínimo, uma ordem de grandeza inferior à emitância horizontal. A obtenção de emitâncias de tal ordem é o desafio tecnológico dos anéis projetados como fontes de luz síncrotron.

A luz síncrotron possui ainda uma estrutura temporal determinada pelo fato de que o processo de aceleração é ressonante. Isto permite o estudo de fenômenos dinâmicos que é, quando não completamente impossível, extremamente difícil com fontes convencionais de ultravioleta e raios-X.

B. Ímãs Deflectores

O espectro de emissão é caracterizado por um comprimento de onda crítico tal, que metade de toda a energia é emitida com comprimentos de ondas menores do que o crítico:

$$\gamma_c \text{ (nm)} = 1,864 / B(T) E^2(\text{GeV}). \quad (2)$$

Equivalentemente:

$$\epsilon_c \text{ (KeV)} = 0,665 E^2(\text{GeV}) B_o(T).$$

3)

onde $B(T)$ é o campo defletor em Tesla. A Figura 1 mostra a forma geral de espectros de ímãs deflectores.

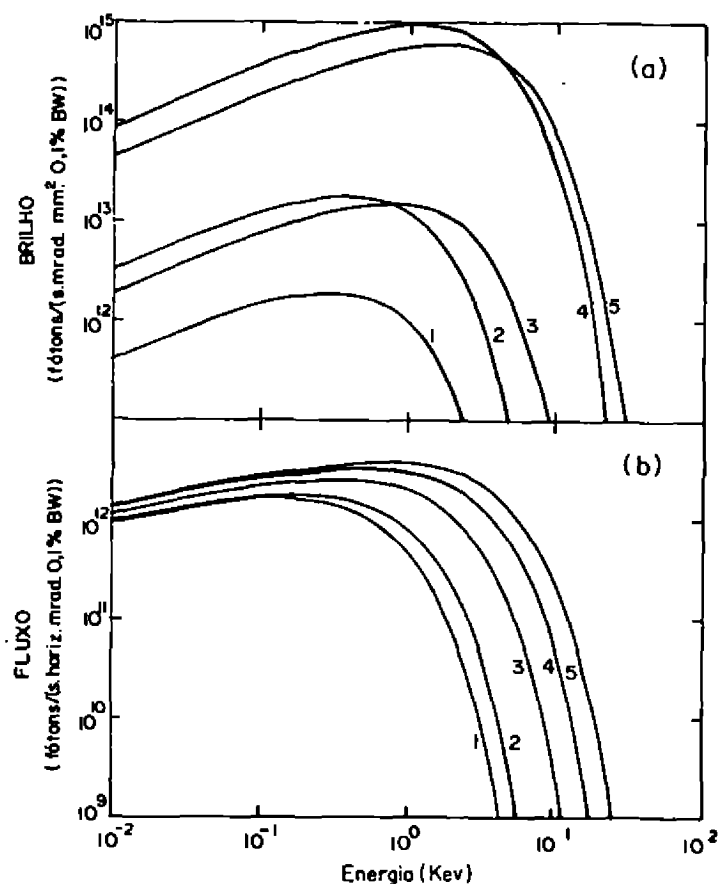


Fig. 1: Brilho (a) e fluxo (b) associados aos espectros de emissão de fótons, correspondente ao anel do Projeto UVX do LNL e de outros laboratórios (calculados para uma corrente eletrônica de 100 mA). 1) NSLS-UV; 0,75 GeV (Brookhaven). 2) Super ACO; 0,8 GeV (Orsay). 3) LNL-UVX; 1,15 GeV (Campinas). 4) ALS; 1,5 GeV (Berkeley). 5) Bessy II; 1,7 GeV (Berlin).

C. Dispositivos de Inserção

A radiação emitida nos smás defletores é determinada pelas exigências da engenharia do anel. É interessante desacoplar, tanto quanto possível, as características espectrais da radiação emitida destas limitações. Isto é realizado pelos chamados dispositivos de inserção.

Os dispositivos de inserção produzem campos magnéticos localizados, transversais à trajetória ideal, preservando as propriedades globais da órbita eletrônica.

Eles alteram localmente o raio de curvatura, provocando a emissão de radiação com características especiais. Há vários tipos desses dispositivos.

Um parâmetro adimensional importante para descrevê-los quantitativamente é:

$$K = \gamma \cdot \delta = 0.934 B_0(T) \lambda_u(\text{cm}), \quad (4)$$

onde B é a máxima deflexão angular do feixe, $B_0(T)$ é o máximo campo deflector em Tesla e $\lambda_u(\text{cm})$ o comprimento de onda da periodicidade do campo magnético, ao longo da trajetória ideal.

Citamos em primeiro lugar, os dispositivos nos quais a deflexão angular local é superior ao ângulo de abertura do cone de luz ($K > 1$: "wigglers", "wavelength shifters", onduladores de alta deflexão). Em geral, o campo magnético local nestas inserções é muito superior ao dos ímãs deflectores, o que faz com que o espectro emitido seja muito mais "duro", pela equação (3).

Em segundo lugar, temos os dispositivos em que a deflexão angular local do feixe de partículas é inferior à abertura do cone de luz ($K < 1$, "undulators", lasers de elétrons livres, onduladores de baixa deflexão). Nesses dispositivos, obtém-se interferência construtiva dos fótons emitidos em sucessivos períodos. A radiação observada ao longo da trajetória não perturbada é caracterizada por uma distribuição espectral de harmônicos da linha fundamental:

$$\lambda_1 (\text{nm}) = 1,3056 \lambda_u (\text{cm}) E^{-2} (\text{GeV}) (1 = K^2/2) \quad (5)$$

A radiação emitida por um ondulador de baixa deflexão é parcialmente coerente na direção transversal. A fração do fluxo de fótons coerente é dada por $B \cdot (\lambda/2)^2$, onde B é o brilho espectral e λ o comprimento de onda. O feixe de fótons possui ainda uma coerência longitudinal.

2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA: ESPECTROSCOPIAS

2.1. Abrangência das Fontes Síncrotron

As fontes de luz síncrotron, com seu espectro contínuo e de alto brilho, são fontes universais de radiação eletromagnética. A energia máxima da radiação aproveitável emitida pelos ímãs deflectores é da ordem de 4 vezes o valor de ϵ_c , dado pela equação (3) da seção 1.3. A absorção e espalhamento inelástico de fótons permite o estudo da

estrutura eletrônica e vibracional de átomos, moléculas e sólidos. O espalhamento elástico permite o estudo da estrutura geométrica da matéria. A variedade de aplicações da luz síncrotron em espectroscopia é abrangente demais para uma revisão neste documento. A Figura 2 mostra esquematicamente essas aplicações em função da energia dos fótons utilizados. É óbvio que as técnicas nela mencionadas podem ser utilizadas independentemente da luz síncrotron. Entretanto, a fim de ilustrar as vantagens desta fonte, descrevemos abaixo alguns resultados recentes que não poderiam ter sido obtidos em outro tipo de fonte.

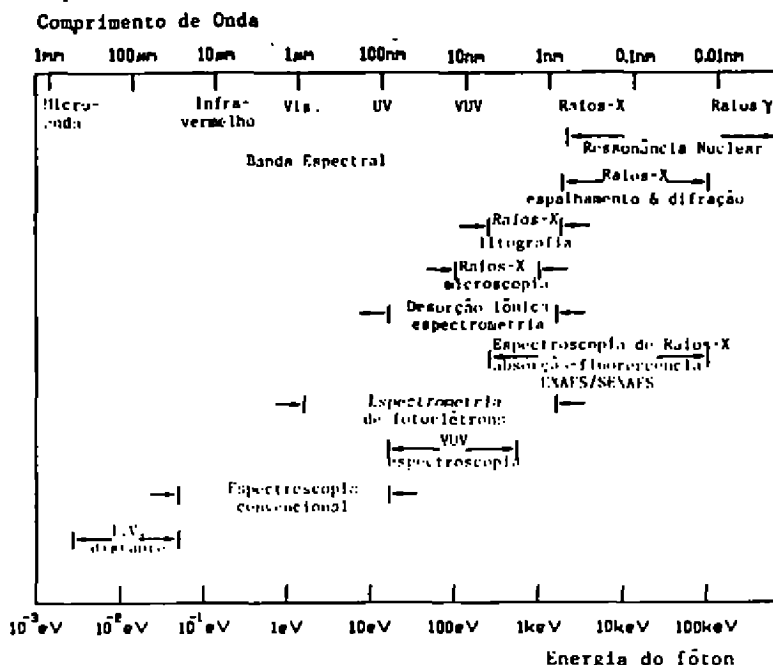


Fig. 2: Técnicas experimentais que utilizam luz síncrotron e domínios espectrais de aplicação.

É interessante mencionar que uma pesquisa bibliográfica realizada na revista *Physical Review Letters* para o ano de 1988 mostrou que em 50% dos exemplares havia um artigo sobre experimentos utilizando luz síncrotron.

2.2. Alguns Resultados Recentes

Em uma área tão vasta e ativa quanto a de utilização de luz síncrotron, uma revisão completa de resultados recentes está fora de questão. Nesta seção,

mencionaremos apenas trabalhos na área da Física da Matéria Condensada, coletados em uma pesquisa bibliográfica realizada para o ano de 1988 na revista de maior prestígio entre a comunidade internacional, *The Physical Review Letters*.

A. Estrutura dos Materiais

Mao et al. (*Phys. Rev. Lett.* 60, 2649, 1988) realizaram estudos de difração de raios-X em cristais de He, a pressões de 23,3 GigaPascal (233 kiloBar). Este problema não pode ser atacado com fontes convencionais porque a seção de choque de espalhamento do He ($Z=2$) é muito pequena e a alta compressibilidade do material faz com que seu volume seja extremamente reduzido dentro de uma célula de diamante. Somente o alto brilho e colimação de uma fonte de luz síncrotron permitem a realização destes estudos, que revelam propriedades interessantes da matéria sujeita a condições extremas. As teorias existentes não explicam adequadamente os resultados de Mao et al. Em um trabalho de calibração de uma célula de diamante até 255 GPa, Vohra et al. (*Phys. Rev. Lett.* 60, 574, 1988), usaram um feixe de raios-X colimado de 5 microns de diâmetro! A estrutura da interface entre um cristal e um sólido amorfo, no caso, Si-SiO₂, de grande importância prática, possui, também, um interesse para a pesquisa básica. Fuoss et al. (*Phys. Rev. Lett.* 60, 600, 1988), usando um feixe de raios-X de incidência rasante, demonstraram que a ordem cristalina do Si decai para a estrutura amorfa do SiO₂, através de microcristalitos altamente orientados, embebidos em uma matriz amorfa, dentro de uma região de transição, dependente da técnica de preparação, de menos de 250 Å.

B. Transições de Fase

Há muito tempo se suspeita que a fusão dos materiais tem início pela superfície, isto é, que as camadas superficiais se liquefazem a uma temperatura inferior à de fusão do sólido. Apenas recentemente (Fuoss et al., *Phys. Rev. Lett.* 60, 2046, 1988), foi possível demonstrar diretamente este fato, através de estudos de difração de raios-X pelas superfícies (110) e (111) do chumbo. A cinética da transição ordem-desordem do intermetálico Cu₃Au foi investigada por Ludwig et al. (*Phys. Rev. Lett.* 61, 1859, 1988), em escalas de tempo sub-segundo. Este tipo de estudo só é permitido pela alta intensidade do raio-X de uma fonte de luz síncrotron. Ele contribui para um conhecimento mais aprofundado do problema de flutuações em sólidos.

C. Espalhamento Magnético

Uma outra técnica que praticamente exige uma fonte de luz síncrotron é o espalhamento magnético de raios-X. Como é bem sabido, para energias típicas, a

intensidade deste espalhamento é da ordem de 50 vezes inferior ao espalhamento Thomson (elétrico). O espalhamento magnético de raios-X permite estudar separadamente as contribuições orbital e de spin para o magnetismo (algo que não pode ser feito com o espalhamento de nêutrons). Ademais, utilizando a sintonizabilidade da radiação de uma fonte de luz síncrotron, é possível realizar espalhamento ressonante, permitindo, entre outros, um estudo das interações de troca. Alguns resultados recentes para o hólmio podem ser encontrados no artigo de Gibbs et al., (Phys. Rev. Lett. 61, 1241, 1988).

D. Estrutura Eletrônica

Estudos com radiação síncrotron vêm contribuindo para lançar luz sobre alguns problemas nunca resolvidos da teoria de sólidos. Apesar de seus sucessos, a estrutura eletrônica de um sólido calculada a partir da aproximação de uma partícula é sabidamente incompleta. Recentemente, resultados de fotoemissão para o sódio, um metal monovalente considerado o protótipo dos metais tipo elétron livre, mostraram que a largura da banda de condução, tanto para estados ocupados quanto para estados vazios, é inferior ao predito pela teoria de Bloch (Citrin et al., Phys. Rev. Lett. 61, 1021, 1988). Estes estudos, baseados na absorção pelo limiar K, no caso situado a 1071 eV, que exigem fótons de raios-X moles sintonizáveis, só podem ser realizados com uma fonte de luz síncrotron. O estudo da estrutura eletrônica de ligas semicondutoras, importante para a compreensão das propriedades de sólidos desordenados, além de sua importância prática para a indústria eletro-opto-eletrônica, tem na fotoemissão resolvida em ângulo, uma ferramenta poderosa (Hwang et al., Phys.Rev.Lett. 61, 1988). Esta é uma técnica que também exige sintonizabilidade em um amplo espectro e alto brilho da fonte.

E. Ligações Químicas

O estudo de átomos e camadas atômicas adsorvidas em superfícies é importante do ponto de vista da compreensão das propriedades fundamentais das ligações químicas e, igualmente, por suas aplicações práticas em catálise. A técnica de fotoemissão tem sido amplamente empregada neste campo de investigação. Horn et al. (Phys.Rev.Lett: 61, 2488, (1988)) reportam um interessante estudo sobre a mudança do caráter das ligações químicas de metais alcalinos adsorvidos na superfície de Al em função do grau de cobertura da superfície. Sette et al. (Phys.Rev. Lett. 61, 1384, (1988)) reportam, utilizando a técnica de SEXAFS, as alterações nas ligações químicas entre os átomos do substrato, próximos à superfície, para o caso de enxofre e cloro depositados sobre níquel e cobre. Esta técnica depende da disponibilidade de uma fonte sintonizável de fótons, em um largo espectro de energias.

F. Vibrações Atômicas

Spalt et al. (Phys. Rev.Lett. 60, 1868, (1988)) reportam a determinação dos autovetores das vibrações atômicas dos átomos em um cristal de silício, baseado no espalhamento inelástico de raios-X. Esta informação, fundamental para uma compreensão das forças interatômicas, não pode ser obtida pelos métodos convencionais de estudo das vibrações atômicas.

Esta seleção de pesquisas sobre as estruturas geométrica e eletrônica, bem como as propriedades dinâmicas da matéria condensada, não chega a ser representativa ou exaustiva. Não abordamos, por exemplo, as aplicações em Física Atômica e Molecular, em Química, em Biologia, na fabricação de circuitos eletrônicos ou na Medicina. A amplitude das aplicações das fontes de luz síncrotron e sua importância científica, tecnológica e econômica para a próxima década pode ser medida pela concessão de um prêmio Nobel (Química, 1988), pelo número de fontes sendo construídas e pelas indústrias que estão desenvolvendo ou adquirindo este tipo de equipamento.

3. FÍSICA DE ACELERADORES

3.1. O Problema

A construção de um acelerador é, em geral, um empreendimento complexo e caro. A fim de minimizar os riscos de um fracasso, a máquina deve ser cuidadosamente projetada. Isto requer o estudo das equações de movimento de uma partícula carregada, relativista, sujeita a campos eletromagnéticos. As equações básicas são, obviamente, conhecidas. Após a construção, os estudos teóricos são indispensáveis, a fim de orientar os testes e operação do acelerador.

O conjunto de ímãs defletores (dipolos) define uma curva fechada, a trajetória ideal, que seria percorrida por uma partícula de energia constante para cada valor do campo defletor e de momentum transversal zero. A relação entre o raio local de curvatura, momentum e campo defletor é dada por:

$$P_0 = qB_0R,$$

onde P_0 é o momentum, q a carga da partícula, B_0 o campo defletor e R o raio de curvatura. Para um elétron relativístico:

$$R(m) = 3,336 E(\text{GeV}) / B_0(T) \quad (7)$$

O vetor tangente à trajetória ideal define, em cada ponto, um dos membros de um conjunto ortogonal de vetores unitários. Os outros dois membros definem o plano transversal. Como, em geral (mas não necessariamente), a trajetória ideal é plana, os dois outros vetores unitários apontam, respectivamente, na direção radial (no plano da órbita) e na direção vertical ao plano da órbita.

A rede magnética de um acelerador ou anel de armazenamento, composta por ímãs defletores (dipolos) e focalizadores (quadrupolos e multipolos de ordem mais alta) é projetada a fim de que partículas com momento em torno de P_0 oscilem na vizinhança da trajetória ideal, ao mesmo tempo em que se deslocam ao longo dessa trajetória. As oscilações transversais são chamadas de oscilações betatron (horizontais e verticais); as oscilações longitudinais são chamadas de oscilações síncrotron.

Quando a rede possui apenas ímãs dipolares e quadripolares, as oscilações betatron são descritas por equações lineares. O bom desempenho de um anel exige, contudo, a inserção de ímãs sextupolares, sem contar com a presença indesejada, porém inevitável, de componentes multipolares de ordem mais alta. Neste caso, as equações das oscilações betatron horizontal e vertical se tornam equações não-lineares, com dois graus de liberdade acoplados. A solução fechada deste problema, como é bem sabido, não existe. Fenômenos tais como ressonâncias e oscilações caóticas aparecem no tratamento do problema.

As oscilações longitudinais são definidas com respeito a uma partícula ideal, a partícula síncrona, que se move ao longo da trajetória ideal de forma a, em cada período de revolução, absorver da radiofrequência exatamente a quantidade de energia perdida por emissão de luz síncrotron. Estas oscilações são controladas pelas características do campo acelerador.

O processo de emissão de fótons leva a um amortecimento das oscilações de tal forma que as partículas tendem para a trajetória ideal. Ao mesmo tempo, entretanto, as excitações aleatórias da energia e momentum das partículas, devidas à emissão de fótons, fazem com que se estabeleça um equilíbrio dinâmico. Formalmente, este problema se assemelha ao das colisões moleculares que levam ao fenômeno de atrito (viscosidade de um líquido) e ao movimento Browniano (excitações aleatórias do movimento de uma partícula imersa no líquido).

É necessário, também, incluir nas equações de movimento termos de erros estocásticos, resultantes de falhas de construção dos ímãs, imperfeições materiais que

modificam o perfil do campo magnético e erros de alinhamento dos componentes da rede magnética.

Além do problema de uma partícula, acima descrito, deve ser levado em conta o fato de que temos um número grande de partículas carregadas (10^9 - 10^{11}), movendo-se dentro de um mesmo pacote, que interagem entre si. Os problemas nesta área são similares aos encontrados na Física Estatística de Não-Equilíbrio.

Finalmente, as partículas interagem com os campos eletromagnéticos criados por elas próprias e com o meio ambiente, isto é, a câmara de vácuo e seus componentes. Essas interações podem levar à realimentação positiva de certas oscilações, isto é, a instabilidades.

Apesar das equações básicas serem conhecidas, as dificuldades associadas às não-linearidades e aos problemas das condições de contorno para os campos eletromagnéticos (estes são específicos de cada projeto de câmara de vácuo) fazem com que a solução do problema não seja trivial.

3.2. Métodos de Solução

Os métodos de solução adotados podem ser analíticos ou numéricos. Como em qualquer outro ramo da física, os métodos analíticos, apesar de conceitualmente poderosos, frequentemente se revelam incapazes de tratar situações reais. Por outro lado, os métodos numéricos, apesar de poderem incorporar muitos aspectos de uma situação realística, não costumam dar uma visão mais profunda do problema. Em Física de Aceleradores, as duas técnicas são utilizadas, com o mesmo espírito, sucessos e fracassos que em outras áreas.

3.3. Interação Teoria Experiência

A Física de Aceleradores cobre um domínio que vai desde estudos básicos até aplicações de engenharia. O teórico de aceleradores trabalha, em geral, junto a um grupo de projeto e construção dessas máquinas. Cada equipamento é único, com suas próprias características.

Há dois problemas centrais da interação teórica-experimental nesta área da Física:

O primeiro diz respeito à maximização da corrente armazenada. Para tanto, é necessário estudar detalhadamente a impedância (eletromagnética) da câmara de vácuo e de seus vários componentes, a fim de evitar o aparecimento de instabilidades que ocasionam a limitação da corrente total armazenada.

O segundo diz respeito à estabilidade temporal e espacial do feixe, bem como a sua emitância, a fim de otimizar a utilização e o brilho do feixe de fótons.

4. INTERAÇÃO COM A INDÚSTRIA

4.1. Tecnologia de Aceleradores

As tecnologias associadas com aceleradores de partículas compreendem campos tão variados como ultra-alto-vácuo, eletrônica, mecânica de precisão e hardware e software de controle. Elas têm um valor econômico bem conhecido. Por exemplo, um recente estudo do CERN mostrou que, para cada franco suíço gasto em equipamentos e componentes, as indústrias fornecedoras faturam com vendas para outros clientes, em consequência dessas compras, três francos suíços. Este acréscimo é devido a inovações tecnológicas, ao prestígio adquirido como fornecedores do CERN (garantia de qualidade do produto), e a novos produtos desenvolvidos em função da interação com o CERN. Além dos aspectos gerais das tecnologias de aceleradores, estas máquinas possuem aplicações próprias.

4.2. Aplicações Médicas

A aplicação médica mais corriqueira de um acelerador de partículas é no diagnóstico com raios-X. Esta aplicação está sendo objeto de desenvolvimentos visando a utilização da luz síncrotron, por exemplo, na angiocoronariografia não invasiva. Vários laboratórios, notadamente, HASYLAB (Hamburgo), SSRL (Stanford) e NSLS (Brookhaven) possuem instalações de testes clínicos desta nova técnica.

Aceleradores de prótons têm sido usados na terapia de tumores. Recentemente, o Centro Médico de Loma Linda, na Califórnia, adquiriu um síncrotron de prótons, desenvolvido no Fermilab, para tratamento de câncer. Aceleradores lineares de elétrons são instrumentos difundidos em todo o mundo para as mesmas finalidades.

4.3. Aplicações na Agricultura

Acceleradores de elétrons encontram aplicação na esterilização de sementes. O Instituto de Física Nuclear de Novosibirsk, USSR, por exemplo, instalou dois destes equipamentos em um terminal graneleiro em Odessa.

4.4. Aplicações em Indústrias de Materiais

Utilizam-se aceleradores de elétrons para o tratamento de polímeros como parte de processos de fabricação.

4.5. Anéis Compactos

Na próxima década, anéis de armazenamento de elétrons funcionarão em fábricas de circuitos eletrônicos de altíssima densidade de integração como fontes de raios-X para microfotolitografia. A IBM adquiriu, recentemente, um anel "compacto" da empresa Oxford Instruments. No Japão, várias companhias estão construindo seus próprios anéis compactos. A associação entre a Texas Instruments e a Hitachi para produção de memórias de 4, 16 e 64 megabites revela a dimensão dos investimentos econômicos envolvidos, face aos quais o custo de um anel de armazenamento compacto (10 a 20 milhões de dólares) empalidece.

5. SITUAÇÃO DOS LABORATÓRIOS DE LUZ SÍNCROTRON NO MUNDO

A utilização sistemática de luz síncrotron começou na década de 60. Nessa época diversos grupos de pesquisa, em vários laboratórios da Europa e dos EUA, instalaram janelas apropriadas para permitir a saída da radiação pelos ímãs dipolares de anéis de acumulação de elétrons e pósitrons, que eram simultaneamente utilizados para o seu fim básico em experiências de física de altas energias.

Com o aumento progressivo do interesse dos usuários de luz síncrotron, e um simultâneo desinteresse por parte dos físicos de altas energias, vários anéis começaram, no início da década de 70, a ser "parcialmente" dedicados, ou seja, a ser usados alternativamente por usuários de luz síncrotron e físicos de altas energias.

Em fins da década de 70, começou a construção de anéis de acumulação de 2a. geração, com o fim exclusivo de produzir luz síncrotron. Esses passaram a ser utilizados num regime totalmente "dedicado".

Em anos recentes, iniciou-se a construção de anéis de 3a. geração que visam a obtenção de feixes de radiação de alta qualidade, produzidos quase que exclusivamente por inserções (onduladores ou wigglers), em lugar de serem gerados pelos ímãs dipolares.

Os anéis de acumulação podem ser classificados em anéis de baixa e alta energia, os quais permitem a obtenção de fótons de energia até um limite superior de aproximadamente 1 KeV (anéis UV) ou até energias superiores a 10 KeV (anéis de raios-X). Consideram-se como anéis UV aqueles de energia eletrônica inferior a $E < 1.5$ GeV.

No Quadro 1 estão listados os anéis de acumulação que já estão sendo utilizados como fontes de luz síncrotron ou estão em fase de construção. Existem na atualidade um total de 37 fontes de luz síncrotron, das quais 25 estão em operação e 12 em construção. Delas, 21 são anéis ultravioleta e 16 de raios-X. Quase todas as fontes estão localizadas em países do 1o. mundo, com exceção das que estão em construção na China, Taiwan e Brasil. Há também projetos de fontes de luz síncrotron aprovados na Índia e na Coreia.

QUADRO I

Laboratórios de Luz Síncrotron em Operação ou em Construção

Local	Anel Laboratório	Energia (GeV)	Tipo
BRASIL	Campinas (LNLS)	2.3	C, Ded
CHINA	Beijing BEPC(I HEP)	0.2-2.8	C, Par
CHINA	Hefei HESYRL(USTC)	0.8	C, Ded
INGLATERRA	Daresbury SRS	2.0	O, Ded
FRANÇA	Orsay DCI(LURE)	1.8	O, Ded
FRANÇA	Orsay SuperACO(LURE)	0.8	O, Ded
FRANÇA	Grenoble (ESRF)	6.0	C, Ded
ALEMANHA	Hamburg DORIS(DESY)	5.5	O, Ded
ALEMANHA	W.Berlin Bessy I	0.8	O, Ded
ALEMANHA	W.Berlin Bessy II	1.5	C, Ded
ITALIA	Frascati ADONE	1.5	O, PDed
ITALIA	Trieste ELETRA	1.5	C, Ded
JAPÃO	Tsukuba Pho Factory(KEK)	2.5	O, Ded
JAPÃO	Tsukuba Accumulator(KeK)	6-8	O, PDed
JAPÃO	Tsukuba TRISTAN(KeK)	30	C, Par
JAPÃO	Tsukuba TERAS(ETL)	0.6	O, Ded
JAPÃO	Tóquio SOR(ISSP)	0.4	O, Ded
JAPÃO	Okasaki UVSOR(IMS)	0.6	O, Ded
TAIWAN	Hsinchu (SRRC)	1.3	C, Ded
SUÉCIA	Lund MAX	0.55	O, Ded
EUA	Gaithirsburg MDSURF(NBS)	0.3	O, Ded
EUA	Ithaca, NY CESR(CHESS)	5.5	O, Par
EUA	Stanford, CA SPEAR(SSRL)	4.0	O, PDed
EUA	Stanford, CA SXRL	1.0	C, PDed
EUA	Stanford, CA PED	15.0	O, Par
EUA	Stoughton, W Tantalus(SRC)	0.24	O, Ded
EUA	Stoughton, W Aladdin(SCR)	1.0	O, Ded
EUA	Upton, NY NSLS I(BNL)	0.7	O, Ded
EUA	Upton, NY NSLS II(BNL)	2.5	O, Ded
EUA	Berkeley, CA ALS	1.5	C, Ded
EUA	Argonne, IL APS	7.0	C, Ded
USSR	Kakrov N-100(KPI)	0.10	O, Ded
USSR	Moscow Siberia I	0.45	O, Ded
USSR	Moscow Siberia II	2.5	C, Ded
USSR	Novosibirsk VEPP-2M(INP)	0.7	O, PDed
USSR	Novosibirsk VEPP-3(INP)	2.2	O, PDed
USSR	Novosibirsk VEPP-4(INP)	5.7	O, Par

* Projeto Europeu

C: em construção; O: em operação; Ded: dedicado exclusivamente à produção de luz síncrotron; PDed: parcialmente dedicado; Par: utilizado em regime "parasita".

Para ilustrar o tipo de técnicas experimentais implantadas nesses laboratórios, listaremos sucintamente as que se desenvolvem no National Synchrotron Light Source (NSLS) de Brookhaven, onde há dois anéis: um ultra violeta (750 MeV) e um de raios-X (2,5 GeV).

No anel ultravioleta do NSLS existem 35 estações experimentais para pesquisas com as técnicas ou objetivos seguintes: litografia, espectroscopia de raios-X, SEXAFS (Surface Extended X-Ray Absorption Fine Structure), ARUPS (Angle Resolved Ultraviolet Photon Spectroscopy), NEXAFS (Near Edge X-Ray Absorption Fine Structure), reflectância de filmes finos e multicamadas, microscopia de raios-X moles, fluorescência, fotocondutividade, fotoionização, difrismo circular, difrismo circular magnético, emissão de raios-X moles, espectroscopia de elétrons, desorção estimulada, fotoionização em fase gasosa, espectroscopia de alta resolução de níveis profundos, espectroscopia infravermelha, espectroscopia de íons, fotoemissão eletrônica por sólidos, espalhamento de feixes moleculares e emissão de fotoelétrons com polarização de spin.

No anel de raios-X do NSLS, há 46 estações experimentais nas quais se realizam pesquisas utilizando as técnicas ou para as aplicações seguintes: ciência dos materiais, angiografia, radioterapia, espalhamento, EXAFS, espectroscopia de raios-X, topografia, difratometria, cristalografia, SAXS (Small Angle X-Ray Scattering), física de superfícies, difração de raios-X de alta resolução, estruturas magnéticas, transições de fase, espectroscopia de interfases, topografia em tempo real, microtomografia, difratometria dispersiva, difratometria de feixe branco, física atômica e molecular, fotoemissão, reflectância, espalhamento inelástico e microsonda.

O total de cerca de 80 estações experimentais do NLS permite o trabalho de várias centenas de usuários, a maior parte externos. O pessoal permanente é de 190 pessoas incluindo a parte de engenharia e administrativa.

Em todos os laboratórios de luz síncrotron, os usuários devem apresentar propostas, anual ou bianualmente, as quais são julgadas por um comitê de seleção que examina e atribui o tempo de feixe para cada grupo.

6. O LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON

6.1. Breve Histórico

As discussões sobre a conveniência e viabilidade de implantação no Brasil de um Laboratório Nacional de Luz Síncrotron começaram em 1981 no Centro Brasileiro de

Pesquisas Físicas. Em 1982 houve as primeiras discussões públicas: em abril, em Cambuquira, no Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada da Sociedade Brasileira de Física (SBF) e em julho, em Campinas, na Reunião da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC).

Em agosto de 1982 o CNPq convocou uma reunião das Sociedades Científicas em Brasília. Como resultado desse evento, houve uma recomendação de prosseguir com os trabalhos e realizar um estudo de viabilidade mais detalhado.

Em janeiro de 1983 o CNPq criou o Projeto Radiação Síncrotron (PRS) e nomeou o seu Comitê Executivo. Esse Comitê organizou em agosto de 1983, no Rio de Janeiro, o Encontro "Técnicas e Aplicações da Radiação Síncrotron", que contou com 230 participantes.

Uma segunda reunião de Sociedades Científicas foi convocada pelo CNPq em janeiro de 1984. As Sociedades Científicas recomendaram ao Comitê Executivo a elaboração de um anteprojeto e, ao CNPq, a criação do Conselho Técnico Científico (CTC) do Projeto Radiação Síncrotron.

Em reunião do CTC, realizada em julho de 1984, se decidiu criar comissões de estudo de projeto e implantação. Na reunião seguinte, em outubro de 1984, o CTC aprovou uma recomendação ao CNPq da criação de um Laboratório Nacional para a construção e utilização de uma fonte síncrotron.

Em novembro de 1984, atendendo a sugestão do CTC, o Presidente do CNPq criou o Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron (LNRS) e designou o seu Conselho Diretor.

Em janeiro de 1985, a Diretoria do CNPq analisou quatro propostas e escolheu Campinas como sede do LNRS. Nesse mesmo mês, o CCTC do CNPq debateu e aprovou a criação do LNRS.

Em janeiro de 1985, o Conselho Diretor do LNRS enviou a Stanford um grupo de físicos e engenheiros para elaborar um primeiro projeto técnico da fonte.

Em março de 1985, foi criado o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). O novo Presidente do CNPq confirmou o Conselho Diretor do LNRS em sua missão.

Duas reuniões internacionais foram realizadas em dezembro de 1985. No Rio de Janeiro realizou-se o Encontro "Radiação Síncrotron em Países em Desenvolvimento" e em Campinas um Workshop sobre o projeto do LNRS.

Em janeiro de 1986, o MCT designou uma Comissão Nacional para formular projeto, cronograma e orçamento. Em julho de 1986, a Comissão entregou seu relatório ao CNPq, contendo recomendações sobre o cronograma e orçamento.

O CNPq alterou, em setembro de 1986, o nome do LNRS para Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) e nomeou a sua Diretoria e Chefia de Projeto.

Em outubro de 1986, o LNLS iniciou as suas atividades efetivas e adquiriu um prédio industrial em construção. Em janeiro de 1987, o CNPq designou o Conselho Diretor do LNLS.

Em 26 de junho de 1987, foram terminadas as obras civis no prédio industrial e começaram as atividades técnicas do laboratório, concentrando-se, no primeiro ano, na implantação das facilidades necessárias (computador, oficinas mecânica, eletrônica e de vácuo) e na construção do acelerador linear de elétrons.

6.2. O Projeto

O projeto do LNLS é um projeto de longo prazo. Subjacente aos cronogramas de implantação dos aceleradores e das estações experimentais, está um objetivo estratégico para toda uma geração: colocar a comunidade científica e tecnológica brasileira trabalhando na fronteira do conhecimento humano, em competição em pé de igualdade com seus colegas dos países desenvolvidos.

É óbvio que um tal objetivo excede as possibilidades de uma única instituição. Ele requer uma política nacional para o desenvolvimento científico, tecnológico e industrial de larga envergadura. Se esta política será formulada, a tempo para possibilitar o ingresso do Brasil no século XXI como uma nação moderna, em franco crescimento econômico, é uma questão, infelizmente, não respondida. O esforço empregado na implantação do LNLS baseia-se na premissa de que o Brasil não tem opção: ou se moderniza e se capacita para competir internacionalmente com outros países, ou regride a um estágio em que conflitos econômicos e sociais postergarão a um futuro indefinido qualquer projeto para a Ciência e Tecnologia. Preferimos acreditar na hipótese otimista, preparando-nos, assim, para os desafios que o país enfrentará neste final de século e para os quais a Ciência e Tecnologia poderão contribuir de forma marcante.

O sucesso ou o fracasso do LNLs estão indissolúvelmente ligados ao sucesso ou fracasso dos esforços de transformação social, econômica e industrial de um Brasil democrático neste final do século XX. Este é o desafio da próxima década, para o qual a equipe do LNLs busca dar sua contribuição.

6.3. Impacto Científico

O impacto científico das fontes de luz síncrotron ainda está longe de ser esgotado. Como ferramenta para a investigação de materiais, a interação da radiação eletromagnética com a matéria jamais se tornará obsoleta. É concebível que, no futuro, novas fontes, com relação custo/benefício inferior à das fontes de luz síncrotron, venham a ser desenvolvidas para faixas específicas do espectro eletromagnético. Entretanto, a menos de algum avanço científico ou tecnológico insuspeitado, é pouco provável que, nas duas próximas décadas, as fontes de luz síncrotron sejam superadas. O mais provável é que sejam investidos esforços para aperfeiçoá-las em termos de brilho, de sintonizabilidade, de estrutura temporal, através de dispositivos de inserção e de avanços mais ou menos previsíveis na tecnologia de aceleradores.

O vasto leque de aplicações da radiação síncrotron, nos mais variados campos de pesquisa em materiais, faz dela um instrumento excepcional para propulsionar o desenvolvimento científico.

Em 1981, os primeiros usuários brasileiros da luz síncrotron fizeram experiências em laboratórios no exterior. Nos anos seguintes, o número de cientistas brasileiros que se interessaram pela realização de pesquisas utilizando luz síncrotron cresceu, como se pode observar na Figura 3, chegando em 1989 a um total integrado de mais de 40. Esses usuários realizaram experiências utilizando técnicas de EXAFS, espalhamento de raio-X e ultravioleta, difração por cristais únicos (inorgânicos e biológicos) e policristais, espalhamento anômalo, difração por superfícies, etc. Essas técnicas foram aplicadas em estudos de materiais monocristalinos, policristalinos e amorfos, multicamadas e gases. As experiências foram realizadas em diversos laboratórios da França, Alemanha, Inglaterra e EUA. A partir de 1987, coincidentemente com o início das atividades do LNLs, o número de seus usuários se incrementou fortemente. Contribuíram para isso os vários cursos organizados pelo LNLs sobre aplicações e, também, provavelmente, as perspectivas associadas à própria existência do LNLs, atuando como elemento incentivador dos usuários potenciais.

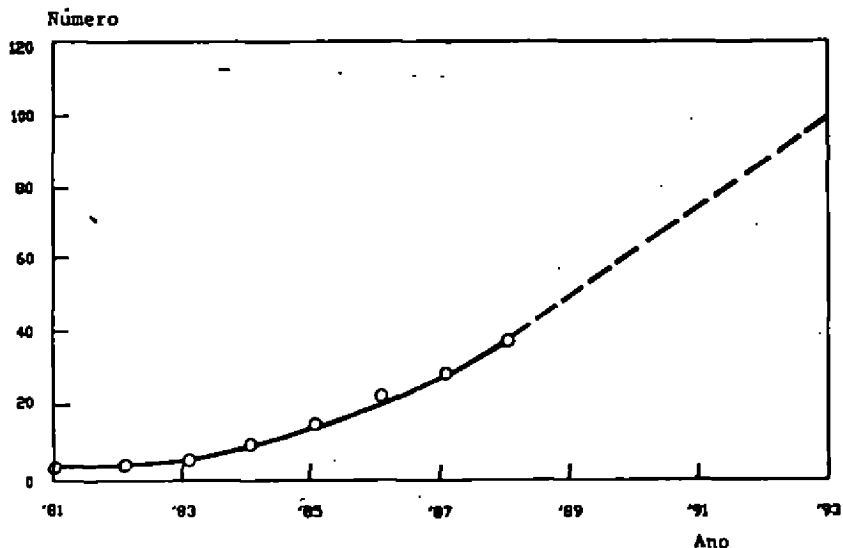


Fig. 3: Número de pesquisadores brasileiros usuários de fontes de luz síncrotron no Exterior.

6.4. Cronograma de Implantação

A. Objetivos para os Próximos Cinco Anos

Tecnologia: Nos próximos cinco anos, o objetivo do LNLS é o de formar recursos humanos nas atividades de projeto e construção de aceleradores de elétrons. A estratégia adotada, de treinamento em casa e de construção dos próprios equipamentos, tem se revelado altamente eficaz na formação de uma equipe organicamente integrada.

O LNLS acompanha com atenção as tecnologias competitivas, a fim de manter o projeto atualizado. Esta é uma das vantagens da opção estratégica de projetar e desenvolver os equipamentos principais no Brasil, ao invés de adquirir uma caixa preta no Exterior. Por exemplo, recentemente, a descoberta de materiais supercondutores a temperatura superior à do nitrogênio líquido, abriu a possibilidade de produção de campos magnéticos intensos a custos mais reduzidos. Entretanto, a curto prazo, isto é, em um horizonte temporal de cinco a dez anos, os novos supercondutores permanecerão uma promessa. O tempo de maturação inevitável para novos materiais, que necessitam ser submetidos a testes de confiabilidade e durabilidade, é tal que, mesmo com todos os problemas de fabricação resolvidos (o que não é o caso), sua utilização em larga escala não ocorrerá antes do início do próximo século. Isto significa que a tecnologia clássica de eletro-ímãs "quentes" ou de supercondutores "frios", que está sendo adotada pelo LNLS, é menos arriscada.

Como parte desta estratégia, o LNLS acompanha os anéis de armazenamento em construção em outros países, a fim de poder aproveitar as melhores soluções, adaptando-se às nossas condições de trabalho.

Ciência: Para os próximos cinco anos, o principal objetivo do LNLS é o de contribuir para a formação de recursos humanos nas áreas de aplicação da radiação síncrotron. Isto tem sido e continuará a ser feito através de um programa de cursos, workshops e conferências que visam introduzir o pesquisador brasileiro à variedade de técnicas e de resultados de pesquisas feitas com fontes de luz síncrotron. Como consequência natural dessas atividades, surgem oportunidades de realização de estágios para pesquisa, de doutorados e pós-doutorados em laboratórios no Exterior, os quais recebem um apoio informal do LNLS.

Na Fig. 3 fez-se uma extrapolação para estimar o número de usuários experientes na época do início do funcionamento da fonte de fótons do LNLS (1993). O valor extrapolado é de aproximadamente 100, podendo este número ser bastante superior, já que a tendência atual é de um aumento da taxa de crescimento do número de usuários. Estes usuários estarão em condições de liderar um número importante de equipes de pesquisa, permitindo se prever um número importante de equipes de pesquisa, permitindo se prever um nível de utilização certamente satisfatório e de volume comparável aos de centros no Exterior.

O LNLS dispõe atualmente de uma equipe científica e de instrumentação de 4 pesquisadores e técnicos. Esse número deverá aumentar para aproximadamente 25 cientistas e técnicos até 1993. Essa equipe é responsável pela construção das linhas de luz, monocromadores e estações experimentais. Nestas tarefas, estão sendo complementados por grupos de pesquisa externos, do Departamento de Química da UFRJ, Departamento de Física da UFPr e da UFMG e do Instituto de Física da USP. Pode-se prever um incremento gradual destas colaborações durante os primeiros cinco anos da década de 90, à medida em que o número de usuários experientes aumente e a disponibilidade da fonte de luz do LNLS seja mais iminente.

Organização: A curto prazo, o LNLS possui como objetivos: a interação com a indústria, a colaboração com laboratórios similares no Exterior e a preparação da comunidade científica e tecnológica no Brasil para uso de um Laboratório Nacional.

A interação com a indústria busca integrar o projeto do LNLS com a base industrial brasileira. Isto tem sido feito através da colocação de pedidos de equipamentos especiais, frequentemente desenvolvidos em colaboração. A divulgação

das atividades do LNLS no meio empresarial é assegurada, entre outras formas, por sua participação na ANPEI (Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Industriais).

A colaboração com laboratórios similares no Exterior é utilizada para acelerar a implantação do projeto, seja através do treinamento de pessoal, seja através da absorção de tecnologias.

A próxima existência de um Laboratório Nacional de grande porte requer a preparação da comunidade científica e tecnológica para uso de suas instalações. Em um país cuja tradição de pesquisa experimental é a do laboratório departamental, de pequena escala, com um sócio-proprietário que detém o controle absoluto dos equipamentos, a idéia de um laboratório nacional é, com razão, encarada com uma certa medida de desconfiança. Em lugar de perceber o Laboratório como um centro multiplicador dos recursos nele investidos, a tendência inicial é a de vê-lo como mais um centro divisor, que vem para subtrair recursos financeiros e humanos dos grupos existentes. Vencer estas desconfianças é um desafio para o LNLS. Isto terá de ser feito progressivamente, à medida que a implantação dos aceleradores possibilitar trazer os usuários para dentro do Laboratório. Enquanto isto não acontece, o estímulo ao desenvolvimento da instrumentação científica por futuros usuários permite manter o diálogo aberto com a comunidade mais diretamente interessada no LNLS.

B. Objetivos para os Próximos Dez Anos

Até o final do século, o LNLS pretende contar com um conjunto de aceleradores e anéis de acumulação de elétrons capazes de dotar o Brasil de fontes de luz síncrotron competitivas internacionalmente.

Ciência: Veremos os primeiros resultados científicos surgirem das pesquisas realizadas com as fontes de luz síncrotron do LNLS.

Tecnologia: Como consequência da entrada em operação dos equipamentos do LNLS, a interação com a indústria deverá se intensificar, pois parte da equipe técnica poderá ser liberada para outras atividades.

Organização: Deverá ser montada a estrutura científica de um Laboratório Nacional, caracterizada pelos comitês de usuários, responsáveis pela análise dos projetos de uso das fontes de luz síncrotron. Nesta etapa estará concluída a integração da comunidade científica e tecnológica com o Laboratório Nacional.

C. Objetivos para o Início do Próximo Século

No início do século XXI, o LNLS contará com uma equipe técnica altamente treinada no projeto e construção de fontes de luz síncrotron. O Laboratório poderá, então, passar a trabalhar na fronteira do campo de aceleradores e de fontes de luz. Paralelamente, haverá uma maturidade científica, que permitirá às diferentes equipes do Laboratório trabalhar juntas no projeto e desenvolvimento de novos instrumentos e novas técnicas experimentais.

O objetivo final do LNLS, de contribuir para a promoção de um desenvolvimento científico e tecnológico integrado na pesquisa em materiais terá sido atingido, então, com o surgimento de uma comunidade produzindo Ciência e Tecnologia na fronteira do conhecimento humano.

6.5. Recursos Necessários

A. Recursos Humanos

No que tange aos recursos humanos para o projeto e construção dos aceleradores, a experiência tem demonstrado não haver dificuldades em se recrutar pessoal de bom nível, dentro do cronograma de implantação do projeto. O grande temor de muitos membros da comunidade científica, de que a falta de pessoal qualificado seria um gargalo intransponível, demonstrou ser produto de uma avaliação incorreta da situação brasileira. Um bom projeto funciona como um atrator de bons profissionais.

É verdade que a experiência específica com tecnologias de aceleradores não existe. Seria bem mais fácil e rápido projetar e construir os equipamentos do LNLS com uma equipe experiente. Na ausência desta, a estratégia de adquirir competência fazendo aceleradores se revelou viável. Dentro de cinco anos, este pessoal estará trabalhando na fronteira do desenvolvimento tecnológico de aceleradores.

O corpo técnico do LNLS deverá crescer do número atual (1989, 60 pessoas) até atingir um patamar da ordem de 150 pessoas em 1992. Não há expectativa de dificuldades maiores para recrutar pessoal competente.

B. Recursos Financeiros

Em condições ideais, o custo anual de construção e manutenção do LNLS seria da ordem de US\$ 10,000,000.00 (dez milhões de dólares) por ano. Nos dois primeiros anos do projeto, foi possível obter um total de US\$ 11,000,000.00 (onze milhões de dólares). O ritmo de implantação está limitado, hoje, exclusivamente por problemas de fluxo de caixa. O que indica que não estamos em uma situação ótima de aproveitamento dos recursos humanos e materiais disponíveis. É de se esperar uma modificação desta situação, na medida em que a situação econômica geral do País melhore.

6.6. Conclusões

A função de um Laboratório Nacional e, mais especificamente, do LNLS, é a de ser um catalizador do desenvolvimento científico e tecnológico, na medida em que ele permite reunir, em um mesmo espaço, especialistas das mais diversas áreas do conhecimento e de diferentes instituições. Ele deve funcionar como um "trocador de idéias", com um fluxo constante de visitantes que terão oportunidade de realizar suas pesquisas e de interagir com seus colegas em um ambiente extremamente propício, no qual eles estarão isolados das preocupações didáticas e administrativas do dia-a-dia de suas instituições de origem.

Um laboratório Nacional faz parte de um sistema integrado de Ciência e Tecnologia. Ele não substitui as instituições tradicionais, nem os laboratórios universitários de pequeno e médio porte. Para que seu projeto seja bem sucedido, é necessário que este sistema descentralizado de pesquisa seja simultaneamente fortalecido. O que se espera é que, durante esta próxima década, seja possível realizar os investimentos indispensáveis ao desenvolvimento científico e tecnológico brasileiro.

III. FÁBRICA DE MÉSONS (ACELERADOR LINEAR)

ESTUDO PRELIMINAR PARA ANTEPROJETO DE ACELERADOR VISANDO A PESQUISA, NO CBPF, EM FUSÃO CATALIZADORA POR MUONS, EM FÍSICA NUCLEAR DE BAIXA ENERGIA, EM FÍSICA DE MÉSONS, E EM APLICAÇÕES DA FÍSICA NUCLEAR À MEDICINA, PARA USO NACIONAL

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Nos últimos 20 anos, no campo da Física Nuclear, os aceleradores de partículas que até intervieram sofreram uma evolução que se afigura como dirigida segundo três direções principais, a saber:

a - A das altíssimas energias, utilizadas através da interação da partícula projétil sobre um alvo fixo, ou pela interação entre a partícula projétil e outra partícula móvel (anel de colisão);

b - A dos aceleradores de íons pesados;

c - A dos aceleradores de prótons de alta intensidade;

Os aceleradores do primeiro grupo foram os responsáveis pelas últimas descobertas no campo das partículas elementares, mediante experiências extremamente sofisticadas, nas quais somente o arranjo experimental pode atingir somas da ordem de dezenas de milhares de dólares. Deve-se adicionar a essa cifra o valor dos aceleradores, e da infra-estrutura em pessoal e meios materiais. Daí resulta que unicamente as super potências (USA, URSS, JAPÃO), ou os agrupamentos de países (CERN) podem prover-se desse tipo de Laboratório.

Os aceleradores de íons pesados também tiveram um grande desenvolvimento, provavelmente em decorrência de se situarem como uma via de acesso obrigatória para o progresso da física nuclear de baixa energia.

Em meados da década de 70 foram propostos, e hoje se encontram em funcionamento, alguns aceleradores do tipo clássico (cíclotrons e aceleradores lineares) cujas peculiaridades eram as altas intensidades, associadas a energias suficientes para produzirem feixes intensos de mésons: os pions sendo produzidos diretamente pela interação entre os prótons acelerados e os alvos nucleares, e os muons sendo

provenientes das desintegrações desses pions. Os Laboratórios assim equipados constituíram-se nas denominadas "Fábricas de Mésons".

Atualmente há em funcionamento, com excelente desempenho, quatro importantes Instituições desse gênero: SIN em Zurich, TRIUMF em Vancouver, LAMPF em Los Alamos, e MSL em Tokio. Em um planejamento para pesquisas da natureza de que trata o presente documento é necessário ter em conta esses Laboratórios. Antes, porém, de lhes considerar as estruturas - tema no qual tem sempre relevo as características físicas principais dos seus Aceleradores - e antes de mencionar os investimentos que lá se fizeram, serão abordadas, embora sucintamente, nos Títulos que se seguem, algumas áreas onde essas Instituições concentram suas pesquisas físicas, biológicas e tecnológicas.

2. ÁREAS DE CONCENTRAÇÃO

2.1. Fusão Catalizada por Muons

Trata-se de alternativa para a fusão nuclear controlada, posta em evidência na reunião da American Physical Society em Novembro de 1956, e que apresenta o atrativo de ser praticável a temperaturas moderadas (inferiores a 1000 graus Centígrados). É um campo em franca expansão e aberto à pesquisa, tendo sido objeto ultimamente de uma marcante intensificação de trabalhos, dos quais uma significativa fração foi apresentada, e discutida, em Seminários específicos para a mCF (Fusão Catalizadora por Muons) ocorridos em Tokio (1986) e em Leningrado (1987).

Na fusão catalizada por muons a fase de plasma das partículas é eliminada através da formação inicial de átomos muônicos, partículas quase neutras que se podem aproximar a distâncias muito curtas e daí formarem quase-moléculas, tudo num tempo muito breve em comparação com a vida do muon. Os componentes dessas quase moléculas são mantidos a curtas distâncias, dentro do alcance das forças nucleares, o que propicia reações de fusão de interesse energético nas quais, ao fim da reação, se recupera o muon para catalizar outros processos. Um dos temas de maior interesse atual na pesquisa aqui em causa, é a minimização de um fator que ainda limita o balanço energético da reação, qual seja, a captura do muon liberado pelo Hélio 4 também produzido, reduzindo assim a cadeia de fusões que poderão ser introduzidas por um único muon inicial. Os números disponíveis no momento situam em cerca de 170 as fusões que um muon inicial produz, dentro do tempo da sua vida útil (decaimento natural, ou captura pelo Hélio gerado). O limiar ("break-even") para um balanço

energético positivo é da ordem de 350 reações por muon. A ultrapassagem desse limiar é uma das metas principais das investigações atuais.

2.2. Física Nuclear de Baixa Energia

Um Cíclotron ou um outro acelerador - que em último estágio forneça o feixe de prótons para a produção dos pions - pode usar, como injetor, uma máquina menor que, no caso do SIN, é um Cíclotron de 72 MeV. Essa máquina injetora pode ser projetada para fornecer energia variável e com alta resolução. Dessa maneira, parte do tempo de uso do Laboratório em causa poderá ser dirigida para pesquisas de reações nucleares de baixa energia. O interesse ainda poderá ser maior se a implantação for compatível com a aceleração de deuteron e de outros íons pesados.

2.3. Aplicações Médicas e Biológicas

A. Produção de Isótopos para Medicina

São dirigidas para os isótopos que, em geral, não podem ser obtidos pelos reatores nucleares (produtores normais de radioisótopos) e que apresentam propriedades significativamente especiais. Inclui-se entre eles o iodo I (123), que não é emissor Beta, tem uma meia vida de 13,2 horas (valor muito conveniente para os usos práticos) e emite raios gama de 159 KeV. Permite, assim, uma concentração de efeito nos tecidos a tratar, sem submeter intensamente o paciente a um dano paralelo de radiações não desejadas. Essas características não são encontradas nos dois isótopos do iodo: o I(125) com $T_{1/2} = 60$ dias e $E = 35$ KeV, e o I(131) com $T_{1/2} = 8,05$ dias, também emissor Beta.

Outros isótopos, de utilização mais recente, como o In(111), Xe(127), e o Br(77), podem ser também produzidos pelo acelerador que sirva como injetor na fábrica de pions.

B. Irradiação de Tecidos com Feixe de Pions

Os feixes de pions oferecem uma importante conveniência, seja em relação aos feixes tradicionais de gamas de bombas de cobalto e gamas da radiação de freinamento de elétrons, seja no que concerne à radiação direta por elétrons de betatrons, de síncrotrons, ou de aceleradores lineares. Essa conveniência decorre da forma pela qual

os píons negativos perdem sua energia em um meio material, como o tecido humano. Além de fazê-lo por ionização, ocorre, no final de seu alcance, a captura do píon por um núcleo, e dessa interação surge uma "estrela" de partículas. Sendo a parte final do alcance a mais eficaz no ataque às células a tratar, o mal que as radiações fazem também às células sadias fica, assim, minimizado. Este tipo de tratamento é feito no SIN, TRIUMF e LAMPF.

C. Feixe de Prótons e Nêutrons

Os feixes de prótons e nêutrons são também utilizados na irradiação de células malignas. Os prótons, geralmente, na forma de feixe primário produzido pela máquina injetora, e os nêutrons como provenientes de reações de "spallation". É procurada a interação direta dos prótons e nêutrons com os núcleos do tecido a tratar, e não apenas o aproveitamento do efeito indireto como no caso das radiações ionizantes.

2.4. Técnica de uSR (Muon Spin Rotation)

Essas técnicas se baseiam no momento magnético dos muons e na rotação subsequente desse vetor quando em presença de campos magnéticos. Os princípios do método datam de 1957 quando da descoberta da violação da conservação da paridade nas interações fracas, e vem recebendo grande impulso. Os pósitrons da desintegração do muon são emitidos preferencialmente na direção do spin do muon pai. Portanto, se forem detetados os pósitrons provenientes de um feixe de muons polarizados (e submetidos a um campo magnético) essas partículas refletirão a precessão do spin do muon nesse campo. Dessa maneira, por exemplo, se podem estudar transições de fase em metais ferromagnéticos e anti-ferromagnéticos, em "vidros de spin", e em outros sistemas. A despolarização do momento magnético do muon em sua trajetória, decorrente das interações com campos estáticos, pode também ser acompanhada pela observação dos pósitrons; o efeito é um amortecimento (*damping*) da precessão, e seu estudo se tem revelado de grande importância.

2.5. Muonium

Muons positivos em meios materiais capturam elétrons formando uma estrutura hidrogenoide com duração limitada. Essas estruturas tem comportamento similar a um átomo de hidrogênio e se prestam excepcionalmente bem para estudos de propriedades

químicas de radicais e moléculas orgânicas. Além disso, funcionam como sondas eficientes em processos de "trapping" e "detrapping" em impurezas e defeitos em sólidos.

2.6. Átomos Mésicos

Muons negativos tendem a ocupar orbitais atômicos de raio muito curto, af permanecendo até sua captura pelo núcleo ou sua desintegração. Além do grande interesse na espectroscopia atômica, esses átomos tem sido amplamente utilizados na determinação de momentos nucleares. As interações hiperfinas de tais átomos também vem sendo estudadas com técnicas semelhantes à de ressonância nuclear magnética.

2.7. Física de Píons e Muons

Com feixes de íons e muons suficientemente intensos - da ordem de $E+9$ (notação de computador para a potência 9 da base 10) píons/s e $E+8$ muons/s respectivamente - pode-se realizar pesquisas que visam ao estudo das interações dessas partículas com núcleos, ou de suas propriedades estáticas. Foi assim que o momento magnético do muon foi medido com sua mais alta precisão. Outra linha importante é a busca de modos "raros" ou "proibidos" de desintegração. Esses temas têm sido incentivados pelas recentes teorias de unificação das interações. Deve ser mencionado ainda o estudo da interação de píons com diferentes núcleos, diretamente vinculado ao aproveitamento de um feixe de píons intenso e monocromático.

3. DADOS DE BASE COMPATÍVEIS COM UMA FÁBRICA DE MÉSONS NO BRASIL

3.1. Dimensionamento de Primeira Ordem para a Implantação

Em consentaneidade com as considerações precedentes - bem como outras considerações importantes constantes do subsequente Ítem 10 - torna-se conveniente que as características dos Aceleradores, que vierem a ser instalados no contexto do Projeto em causa, devam se manter suficientemente próximas de um sistema assim dimensionado:

a - Ciclotron Injetor:

E (max) da ordem de 70 MeV

Feixes Externos:

Prótons (ordem de 100 mA)

Dêuterons

Íons pesados

b - Ciclotron Principal: Semelhante ao do SIN: isócrono do tipo anel

E (max) da ordem de 600 MeV

Feixes Externos:

Prótons (ordem de 100 mA)

Píons (ordem de $E+9$ píons/s (*))

Muons (ordem de $E+8$ muons/s (*))

(* $E+n$ = potência n de 10

O custo do sistema acelerador pode atingir cifra da ordem de trinta milhões de dólares. Essa estimativa é ligeiramente mais elevada do que os números correspondentes ao SIN. A diferença é devida ao balanço entre os acréscimos decorrentes da inflação do dólar americano no mercado internacional, e os custos do desenvolvimento que, nos procedimentos propostos, podem decair para cerca de 1/4 dos que concerniram àquele Laboratório.

Para desenvolvimento do projeto e construção do sistema, é necessária uma equipe mínima cuja composição está abaixo sugerida. Esse efetivo não necessita ser completado inicialmente, podendo crescer gradualmente para os valores alvitados, em função da realidade da evolução do Projeto.

Efetivo proposto:

Cientistas.....	10
Engenheiros.....	15
Técnicos.....	25
Agentes Administrativos.....	8

É estimado que sejam necessários recursos iniciais da ordem de US\$ 200.000,00 (duzentos mil dólares) para o Projeto geral do Laboratório, testes de materiais disponíveis no País, contratação de físicos estrangeiros, e intercâmbio de físicos brasileiros com os de diferentes Instituições que já adquiriram experiência em implantações dessa natureza.

3.2. Sistemática de Abordagem, e Dimensão da Importância

O sistema acelerador que, no caso pertinente, vier a ser instalado para a finalidade aqui considerada - embora venha a ser reprojeto e construído no País - foi suposto, por razões de simplicidade e progressividade ser semelhante ao que integra o SIM (Instituição hoje denominada, oficialmente, PSI - Paul Scherrer Institut). Isso porque - dentro dos procedimentos da busca do saber e da aquisição de experiência para projetar, construir, explorar cientificamente, e administrar um empreendimento dessa ordem - o fato do injetor daquela máquina ser um Cíclotron de menos do que uma centena de MeV cria, implicitamente, uma etapa inicial muito bem caracterizada. Nessa etapa, especialistas em aceleradores, técnicos, engenheiros, físicos, químicos, biólogos, médicos, e industriais, cada grupo a seu turno e na sua vez, deverão empreender um longo trabalho de aprendizagem, adaptação, criatividade e realismo, que se tornam altamente necessários para empreendimentos semelhantes no País. Isso configura um procedimento em etapas, cada uma das quais compreendendo um certo nível de conhecimento e de experiência. Cada um dos níveis, uma vez atingido e consolidado, irá criar a competência devida para poder-se empreender a etapa que se irá seguir. Dentro da mencionada progressividade, os diferentes usos do Laboratório, citados ao longo do Título II, irão se implementando e se aperfeiçoando gradualmente até que, ao término desse processo, se tenham completado todos os itens citados, e se possa implantar a importante etapa que busca a Fusão Nuclear Controlada através de procedimentos de catálise por muons. É dispensável enfatizar, neste texto, a importância nacional e estratégica que assume essa última etapa, no contexto geral de uma busca de soluções para um problema energético de tal magnitude.

IV. EXPANSÃO DO LABORATÓRIO DE IMPLANTAÇÃO IÔNICA

PROPOSTA DE AQUISIÇÃO DE UM ACELERADOR ELETRÓSTÁTICO PARA CIÊNCIA DOS MATERIAIS

1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO **ACIMA** (Acelerador para Ciência dos Materiais)

Esta apresentação do Projeto ACIMA pretende de uma forma sucinta, porém abrangente, descrever as principais atividades do LABORATÓRIO DE IMPLANTAÇÃO IÔNICA (LII) do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IF-UFRGS), bem como justificar e embasar as necessidades de aquisição de uma nova máquina.

1.1. Introdução

As atividades de pesquisa do LII do IF-UFRGS iniciaram no ano de 1983. O acelerador de íons de 400 kV foi adquirido em 1981 e instalado no segundo semestre de 1982, quando começou a operar, sendo ainda hoje o único LII dedicado à pesquisa fundamental existente na América Latina.

Durante estes 5 anos o Implantador de Íons funcionou continuamente, sendo que sua operação - quantificada como o número de horas de feixe no alvo por ano - passou de 1050 horas em 1983 para 1900 horas em 1987, o que significa aproximadamente uma média de 10 horas de feixe/dia, 5 dias por semana, durante 10 meses ao longo de 1 ano, valor que pode ser considerado ótimo quando comparado com outros laboratórios de primeiro nível existentes no mundo.

Este desempenho da máquina deve-se essencialmente a três motivos: i) à qualidade técnica do equipamento fabricado pela High Voltage Engineering Europa (HVEE); ii) ao trabalho competente e eficiente da equipe que opera e mantém o implantador e iii) à existência de um intenso programa de trabalho.

Em paralelo com o ótimo desempenho técnico da máquina, a produção científica dos grupos de pesquisa trabalhando no Laboratório de Implantação Iônica também pode ser qualificada de ótima. Neste período de 5 anos, foram estabelecidas várias linhas de pesquisa em áreas de fronteira na física do estado sólido, e em ciência dos materiais, com intensa produção científica tanto em qualidade quanto em quantidade.

Além dos temas próprios de pesquisa, vários foram os projetos realizados em colaboração com laboratórios e institutos de universidades do País e do estrangeiro, bem como foi intenso o intercâmbio e visita ao LII de pesquisadores brasileiros e estrangeiros ao longo destes anos.

O trabalho desenvolvido no LII pode ser avaliado pela produção científica durante o período de 1983-1988. Em resumo, foram publicados 61 trabalhos em revistas com árbitro; 6 doutores formados; 19 participações em conferências internacionais e 15 atividades de intercâmbio com instituições nacionais e do exterior.

Este quadro mostra que no período de 5 anos o LII superou os objetivos a que se propunha na ocasião da instalação do implantador de 400 kV no início desta década. O grupo de pesquisadores do LII adquiriu, durante o período, a competência necessária para trabalhar com equipamentos mais sofisticados e continuar sua produção científica a nível internacional.

Uma das limitações atuais refere-se ao volume solicitado de trabalho e possibilidade de utilização de outras técnicas "in situ" (ópticas, elétricas, espectroscopia atômica, etc.). Esta limitação deve ser minorada brevemente com uma segunda linha de feixe - em vias de instalação - e o planejamento de uma terceira a prazo mais longo.

A outra, fundamental e maior limitação, é a que se refere à energia da atual máquina, que pela sua própria concepção técnica, não pode ser superada através de qualquer expansão do presente equipamento.

Resumidamente podemos dizer que alcançamos o limite possível com uma máquina de 400 kV. A aquisição de uma nova máquina, de energia de 2 MV possibilitará ao grupo desenvolver novos temas de pesquisa cujos detalhes e justificativas científicas serão demonstrados nos parágrafos seguintes deste projeto.

A instalação da nova máquina trará a possibilidade de institucionalizar no IF-UFRGS um laboratório de pesquisa maior, mais diversificado, atuando em áreas tecnológicas de ponta e com melhores perspectivas de interação com a indústria. A pesquisa na área de Implantação Iônica apresenta uma grande gama de interesses na moderna tecnologia de semicondutores, como alternativa à difusão térmica; na metalurgia de ponta, possibilitando tratamentos de superfícies de aços e metais melhorando propriedades como desgaste, fricção, corrosão, etc.; na óptica integrada; nos estudos de adesão entre filmes finos e substratos e em muitos outros campos. No Item 2 a seguir, algumas destas aplicações são discutidas com mais detalhes.

1.2. Objetivos

A presente proposta envolve a aquisição de um novo acelerador com energia de 2 MV tanto para produção de novos materiais por implantação iônica e irradiação quanto para sua análise por técnicas de retroespalhamento Rutherford (RBS), channeling, reações nucleares em núcleos leves e detecção por recuo elástico (ERDA).

A utilização de um equipamento de 2 MV possibilitará implantações mais profundas. Estas implantações profundas permitirão que as propriedades elétricas, ópticas, magnéticas e mecânicas dos novos materiais assim produzidos sejam investigadas não somente por técnicas de superfície, como também por técnicas mais frequentemente utilizadas em amostras massivas.

A existência de uma máquina com 2 MV de energia possibilitará usar e ampliar as técnicas de análise dos materiais já utilizados aqui, como RBS, channeling, reações nucleares etc., com maior eficiência, resolução e diversificação de casos.

A expansão do LII do IF-UFRGS para a dimensão proposta, permitindo serem obtidos feixes com energias de até 6 ou 8 MeV para íons de carga +3 ou +4, é o caminho natural dos laboratórios que iniciaram com implantadores de algumas centenas de KeV. Citamos como exemplos: 1) o Centro de Espectroscopia Nuclear e de Massa de Orsay-França, que está instalando um acelerador de 2 MV (construído em colaboração com outro laboratório francês da cidade de Strasbourg) junto ao antigo implantador de 200 kV; 2) o laboratório da Universidade de Leuven, Bélgica, que está instalando um acelerador Pelletron da firma NEC, com terminal de 1,7 MV, ao lado de um implantador HVEE de 350 kV.

Isto significa que para continuarmos desenvolvendo programas de pesquisa a nível de fronteira é muito importante realizar-se de imediato a instalação desta nova máquina.

A nossa proposta é de adquirir da firma HVEE um acelerador de 2 MV (single ended), que cumpre a dupla função de ter energia e corrente altas. Esta máquina é um implantador de íons cobrindo a região de 100 kV a 2 MV (para íons ionizados uma vez) com altas correntes e é simultaneamente um sistema de análise comparável como os aceleradores Pelletron e Van de Graaff de mesma energia. Para um laboratório como o nosso, basicamente voltado para a implantação iônica em problemas de Física e Ciência dos Materiais, a máquina da HVEE é a opção desejada. Esta nova máquina trará aos

pesquisadores do LII, assegurados pelas suas capacitações científicas, possibilidades enormemente ampliadas de realizar novos projetos de pesquisa.

A nova máquina, junto com o atual implantador de 400 kV, e demais facilidades do LII, formarão um laboratório de alto nível para uso nacional. O acoplamento de um dos 5 feixes do acelerador de 2 MV com o atual implantador, isto é, as linhas de feixes de um e do outro encontrando-se simultaneamente na posição do alvo estudado, dará novas e fundamentais condições de pesquisa.

Arranjos deste tipo existem em outros laboratórios do exterior, contudo, mais dedicados ao estudo de semicondutores. Aqui em Porto Alegre, tal sistema além de ser usado nas atuais áreas de pesquisa (ligas, compostos, filmes finos metálicos, materiais para microeletrônica, polímeros, adesão entre filmes e substratos, etc.) poderá também ser usado na busca e pesquisa de novos materiais.

A nossa principal atividade de pesquisa tem sido na área de ciência básica. Além de manter continuamente estudos nesta linha, mais recentemente parte significativa da nossa atividade deslocou-se para a área de Ciência dos Materiais analogamente ao que ocorreu em outros laboratórios similares no exterior. Hoje as linhas de pesquisa mais importantes do LII são:

- a) estudo de alcances e distribuição de íons em metais, semicondutores, isolantes e polímeros;
- b) efeitos de implantação e/ou irradiação na dissolução e estabilidade térmica de carbonitreto implantados em aços;
- c) efeitos de implantação e irradiação em polímeros;
- d) efeitos de irradiação na adesão entre filmes metálicos e diversos substratos;
- e) metalurgia de superfícies: formação de silicetos, fases amorfas, etc. por implantação;
- f) dopagem de Si e AsGa e estudos de recozimento de defeitos, oxidação rápida do silício, etc.

Isto mostra que estamos de fato trabalhando em várias áreas de fronteira das atividades que hoje são caracterizadas, na literatura, como Ciência dos Materiais.

2. PROGRAMAS DE PESQUISA

2.1. Possibilidades Abertas do Projeto ACIMA

Além da realização de implantações de íons de praticamente todos os elementos da tabela periódica a energias de até alguns MeV (íons multiionizados), o que abre perspectivas no estudo de novos materiais, o projeto ACIMA trará vantagens no que se refere ao uso mais eficiente de algumas técnicas de análise e na possibilidade de serem implementadas outras técnicas, conforme destacamos a seguir.

A. Retroespalhamento Rutherford (RBS) e Channeling

Passar da energia de 400 keV a 2 MeV traz as seguintes vantagens substanciais:

a) O poder de freamento das partículas alfa tem seu máximo a energias maiores que 1 MeV para os elementos típicos de análise como Al, Si, Fe. Além disso, nestas energias o poder de freamento é conhecido com precisão de 5%. Estes fatos permitem aumentar significativamente a resolução em profundidade.

b) A resolução em massa também aumenta sensivelmente com a energia, passando de $\Delta M_2 = 23$ com $M_2 = 100$ a energia de 500 keV a ΔM_2 MeV.

c) A profundidade possível de ser alcançada e medida aumenta em um fator até 4 com a variação da energia de 400 keV a 2 MeV.

d) Finalmente, a análise RBS poderá ser feita com feixes de elementos mais pesados tipo Li e N aumentando-se notavelmente a sensibilidade à detecção de impurezas. Por exemplo, para o caso de Au o limite de sensibilidade ao ^4He de 400 keV é de 10^{13} at/cm², enquanto que com o ^{14}N a sensibilidade aumenta a 10^{12} at/cm².

B. Técnica de detecção por recuo elástico

Para a detecção de elementos leves em substratos pesados, como por exemplo H em qualquer material, uma das técnicas utilizadas é a ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis). Com esta técnica irradia-se a amostra com um elemento mais pesado que o H, tipicamente He a 2 MeV. O H é determinado com um detector de barreira de superfície, sendo que o dispositivo experimental é o mesmo que para RBS. As vantagens deste método são a maior simplicidade frente às reações nucleares e as correntes menos

intensas evitando aquecimento e eventual deterioração da amostra. Devido à limitação de energia da máquina, esta técnica não é utilizada no nosso laboratório.

C. Reações Nucleares

Com energia superior a 400 keV produz-se uma série de reações nucleares com prótons que permitem a detecção e caracterização de elementos leves. Dentro das reações mais utilizadas em energias até 2 MeV figuram:

Reacção	Energia (E_p)
$^{15}\text{N} (p,)^{16}\text{O}$	429 keV
$^7\text{Li}(p,)^8\text{Be}$	441 keV
$^{19}\text{F} (p,)^{16}\text{O}$	484 keV
$^{13}\text{C} (p,)^{14}\text{N}$	550 keV
$^{27}\text{Al} (p,)^{28}\text{Si}$	992 keV

Além destas reações com prótons, existe uma série de reações com outros feixes que permitem detectar elementos leves como ^{16}O , ^{18}O , ^{24}Mg e ^{31}P . Merece especial destaque a reacção inversa $^1\text{H}(^{15}\text{N},\alpha,\gamma)^{12}\text{C}$ com E_N entre 6-8 MeV, que possibilita medidas do perfil do H em materiais. A pequena corrente de N^{4+} que a máquina fornece é suficiente para esta análise. Na realidade a máquina de 2 MeV permite alcançar todas as reações com dêuterons até 2 MeV e partículas alfa até 4 MeV.

Estas reações nucleares são de muita utilidade porque permitem determinar perfis de implantações, difusão, dosagem, etc. em uma grande quantidade de materiais.

D. Pixe (Emissão de raios-X Induzidos por bombardeamento iónico)

A colisão inelástica de prótons ou partículas alfa no intervalo de energia entre 0.5 e 10 MeV/UAM produz no alvo raios-X característicos do elemento. Desta maneira todos os elementos com $Z > 11$ podem ser analisados em concentrações da ordem de ppm. Utilizando este método podemos determinar qualitativa e quantitativamente as impurezas existentes em um alvo. Esta técnica é muito utilizada em estudos de poluição, permitindo medir a presença de minúsculas quantidades de elementos poluentes.

2.2. Descrição dos Programas de Trabalho

A seguir descrevemos as linhas de pesquisa mais importantes do LII, mostrando as possibilidades amplas e já indispensáveis que a nova máquina trará.

A. Metalurgia de Superfície

Estudo da formação de ligas próximas à superfície (soluções sólidas, compostos intermetálicos, fases amorfas, silicetos) pelos métodos de "Ion Beam Mixing" e difusão auxiliada por radiação (DAR).

Estes métodos consistem basicamente em induzir a interdifusão e a reação de multicamadas de filmes finos metálicos depositados sobre substratos metálicos ou isolantes, pela deposição de energia dos íons bombardeantes próximo às regiões de interfaces das diferentes camadas. Para conseguir uma deposição de energia (por colisões nucleares) nas regiões de interesse é preciso que a energia dos íons seja suficientemente grande (especialmente no caso de íons pesados) para que o freamento dos mesmos não ocorra a profundidades menores do que a profundidade da interface.

Um implantador de alta energia com correntes de íons também altas permitirá fazer pesquisas com multicamadas de filmes finos com espessura no intervalo entre 100 e 1000 nm, que são as espessuras de interesse para aplicações em metalurgia de superfície. A máquina de 2 MV permitirá a ampliação e o desenvolvimento pleno deste campo de pesquisa já implementado aqui no IF-UFRGS.

B. Alcances de Íons Implantados a Alta Energia

Desde o início das atividades do LII, temos estudado alcances de íons implantados de um modo sistemático. Este estudo, restrito à energia máxima de 400 keV dada pelo atual implantador, rendeu ao grupo resultados muito frutíferos. Uma extensão lógica desta linha é a investigação de implantações profundas. Estas atualmente começam a despertar o interesse da comunidade científica. Entre outras razões existem as de caráter tecnológico, em particular as aplicações à tecnologia de semicondutores (tecnologia CMDS, isolamento de dispositivos, etc.). Por outro lado, para a utilização efetiva de implantação de alta energia na indústria, precisam-se de dados experimentais de boa precisão concernentes a distribuições de alcances, assim como cálculos teóricos de alta confiabilidade.

Recentes medidas de implantações profundas de H, B e Li em Si mostraram que as teorias mais recentes (Ziegler, Biersack e Littmark) reproduzem muito bem os dois primeiros casos, mas não o último. Também medidas recentes de P em Si mostram que estes cálculos são inadequados, provavelmente evidenciando que mecanismos físicos não relevantes a baixas energias passam a contribuir significativamente. Portanto é necessário um estudo sistemático de implantações de alta energia de diversos tipos de íons em diversos tipos de alvos (preferencialmente em alvos de interesse na microeletrônica com Si, Ge e GaAs) com o fim de dar as bases experimentais para modelos teóricos mais elaborados.

Uma máquina de 2 MeV permite por um lado implantações profundas (até 2 MeV para íons simplesmente ionizados, até 4 MeV para duplamente ionizados, etc), alcançando a região de microns. Para a detecção destas implantações profundas, no caso de elementos leves, utiliza-se a técnica de reações nucleares. Para elementos mais pesados poder-se-ão realizar medidas de Retroespalhamento Rutherford com íons dupla e triplamente ionizados. Em ambos os casos a máquina de 2 MeV será uma excelente ferramenta de trabalho.

Este programa é de sumo interesse, e de grande atualidade. Permitirá a continuidade da forte interação com o grupo teórico do Dr. J. P. Biersack, do Hahn-Meitner-Institut (Berlim), que está desenvolvendo uma teoria mais atualizada de alcances de íons implantados a maior energia, tendo em vista os resultados acima mencionados.

C. Efeitos de Irradiação na Dissolução e Estabilidade Térmica de Carbonitreto Implantado em Aço

Recentemente iniciamos um programa que estuda os efeitos de pós-irradiação com partículas de He, Ar, Kr e Xe em nitreto e carbonitreto. Os carbonitretos são formados por implantação de N em diversas ligas de aço e a caracterização dos efeitos de pós-irradiação e evolução térmica dos mesmos é realizada via a técnica Mössbauer de Elétrons de Conversão. Contudo, esta caracterização é incompleta já que a difusão e a reprecipitação do N implantado é estudada de uma forma indireta. Através da máquina de 2 MeV estaremos em condições de seguir o perfil de N implantado via reação $^{15}\text{N}(p,\alpha)^{12}\text{C}$. Esta técnica é de uso comum em outros laboratórios que possuem este tipo de máquina. Também se pode fazer o perfil do C utilizando a reação (p,p') ou (p,d) . Desta maneira teremos uma caracterização completa do que acontece com os carbonitretos quando são bombardeados e recozidos a diversas temperaturas.

D. Efeitos de Irradiação e Implantação em Polímeros

Durante os últimos 3 anos estamos realizando um trabalho sistemático em polímeros, estudando os efeitos de implantação e irradiação.

Foi assim que determinamos que os elementos pesados, quando implantados seguem um perfil de implantação regular. Contudo, elementos mais leves, (B, Li e F) implantados no regime de poder de freamento eletrônico sofrem desvios do perfil regular. Portanto é interessante estender esta investigação a elementos mais pesados, tipo Na, Si, etc. Estes elementos seriam implantados a mais alta energia e sua caracterização deve ser feita via RBS de alta energia ou reação nuclear. Desta maneira poderemos continuar um estudo, no qual de certo modo somos pioneiros, mas que só pode ser continuado com máquina de alta energia.

Por outro lado, encontramos que os gases nobres Xe e Kr implantados em polímeros, difundem à temperatura ambiente. Os coeficientes de difusão são função da dose implantada, indicando que os danos jogam um papel importante no processo. É de interesse ampliar este estudo a gases mais leves tipo Ne e Ar. Para poder caracterizar os perfis de implantação e difusão destes íons mais leves é necessário usar a técnica de RBS com partículas alfa de 2 MeV, com o fim de poder alcançar uma boa separação da massa entre o íon implantado e os átomos do substrato.

E. Estudos de Difusão de Elementos Implantados

Uma análise completa de difusão de íons leves em alvos pesados somente pode ser feita com reações nucleares a energias mais altas. A própria difusão de um átomo de massa maior mas não muito diferente da massa da matriz necessita RBS com íons de mais alta energia. Por exemplo, o estudo de difusão de Hf e Zr tem alto interesse na tecnologia de reatores. Por limitação das técnicas tradicionalmente utilizadas estes estudos têm sido pouco investigados.

A máquina de 2 MV permitirá uma ampliação intensa deste importante campo de trabalho, no qual já temos considerável experiência.

F. Estudo de Poluição Utilizando a Técnica de Pixe

A investigação da presença de pequenas quantidades de átomos que caracterizam os materiais poluidores é feita de modo muito eficiente via prótons com energia de 1 MeV pelo menos. Os materiais emitem raios-X característicos quando bombardeados com prótons desta energia, permitindo as suas identificações.

A aquisição da nova máquina proporcionará condições de atividade interdepartamental tanto na área de ecologia como em astrofísica nuclear, datação arqueológica, geologia, metalurgia tribológica, química, físico-química etc.

G. Efeitos de Irradiação e Implantação na Adesão de Filmes Finos

O uso de filmes finos nas tecnologias de microeletrônica, óptica, sistemas magnéticos e coberturas protetoras depende para o seu sucesso da integridade, estabilidade e durabilidade de tais filmes e de sua adesão ao substrato. Recentemente ocorreram avanços significativos na aplicação de feixes de íons para resolver alguns problemas nesta área, aumentando as possibilidades de produzir melhor adesão mesmo em sistemas filme e substrato sem afinidade química.

A irradiação da interface filme-substrato com íons leves de alta energia mostrou-se eficiente na melhoria de adesão em sistemas metal-polímero, metal-vidro e metal-cerâmica, que são necessários em várias áreas de ponta da indústria (microeletrônica, metalurgia, etc.).

A expansão deste campo de trabalho no IF-UFRGS somente será possível com o novo acelerador, pois para tanto é necessário dispor de íons de F, Cl, Ne, N de alguns MeV de energia.

H. Implantação em Semicondutores

A implantação de íons com o fim de dopagem do Si é uma alternativa bem estabelecida a difusão das impurezas por processo térmico. O programa de microeletrônica do IF-UFRGS com Si já está bem estabelecido e considerável êxito tem sido obtido no estudo dos processos de eliminação de defeitos de Si implantado por recozimentos lento e rápido. Outras áreas em desenvolvimento são a formação de silicetos na superfícies através de mistura por feixe iônico, bem como a formação de

camadas enterradas do isolante SiO_2 por implantação de doses altas de Oxigênio em Si monocristalino.

Atualmente estão sendo iniciados estudos de implantação em AsGa, que é um material mais pesado do que Si e portanto necessita-se de energias de implantação maiores. Como o único laboratório de implantação iônica com experiência no País é o de Porto Alegre, é essencial que estejamos preparados para a moderna tecnologia de microeletrônica com AsGa, que parece ser muito promissora.

3. EQUIPES CIENTÍFICA E TÉCNICA

3.1. Equipe de Pesquisadores

O atual grupo de pesquisadores trabalhando nas várias linhas de implantação iônica é composto de 8 doutores, dos quais 6 têm experiência de pelos menos alguns anos em orientação e liderança de pesquisa. Esta equipe está perfeitamente qualificada para levar o novo projeto ACIMA aos seus objetivos. As qualidades científicas e técnicas da equipe e a sua eficiência na implementação e orientação de pesquisa de fronteira e de pós-graduação foram demonstradas durante os cinco anos de funcionamento do LII deste Instituto, pela produção científica e formação de pessoal mencionada no item 1.1. . A relação dos pesquisadores é a seguinte:

- 1) Fernando C. Zawislak, doutor 1967 - responsável pelo projeto
- 2) Moni Behar, doutor 1970
- 3) Israel J. R. Baumvol - doutor 1978
- 4) Joel P. de Souza, doutor 1978
- 5) Rogério P. Livi - doutor 1979
- 6) Lívio Amaral - doutor 1983
- 7) Paulo H. Dionísio - doutor 1986
- 8) Paulo F. P. Fichtner - doutor 1987

Fazem parte também do grupo mais 6 estudantes de doutorado, 6 de mestrado e 10 alunos de iniciação científica.

3.2. Equipe de Pessoal Técnico

A atual equipe técnica do LII é constituída por:

- 1) Agostinho Bulla - Engenheiro Eletrônico
- 2) Clodomiro Castello - Técnico-operador do Implantador
- 3) José Carlos da Silva - Auxiliar de operador do Implantador

Isto significa que, excluindo os colaboradores de outros centros, a equipe total é composta de 20 pesquisadores (incluindo) os alunos de pós-graduação, 3 técnicos e 10 alunos de iniciação científica.

3.3. Infra-Estrutura Institucional

Além da equipe técnica própria do LII o novo projeto contará com toda a infraestrutura administrativa e experimental do IF-UFRGS, constituída de oficinas mecânicas, de vácuo, laboratório de eletrônica, etc.

4. ASPECTOS TÉCNICOS DO PROJETO

4.1. Características Básicas da Máquina

A máquina de 2 MV da High Voltage Engineering Europa (Amersfoort, Holanda) é um acelerador de íons pesados (single ended) com as seguintes características básicas:

- 1) Sistema de troca de fonte de íons que permite trocar a fonte sem a abertura do tubo principal.
- 2) Sistema de seleção de massa com um filtro de análise de Wien, que separa somente os íons desejados.
- 3) Chaveamento magnético para 5 (cinco) saídas a 0° , $\pm 15^\circ$ e $\pm 30^\circ$ com produto de massa x energia de 80 UMA-MeV a 30° e 321 UMA-MeV a 15° .
- 4) Uma linha de feixe completamente equipada para RBS e outra para implantação.
- 5) Todo o sistema de vácuo implementado com bombas turbo-moleculares.

4.2. Instalações e Área Construída Necessária

O acelerador, a sala de controle, de montagem de fontes de íons, de preparação de amostras, oficinas de apoio mecânica e eletrônica, sistema de aquisição e análise de dados, bem como almoxarifado da máquina devem estar no mesmo nível da construção, e por razões técnicas de segurança tal nível deve ser subterrâneo. Se incluirmos a transferência do implantador de 400 kV para o mesmo local, a área total construída necessária será de 700 m².

Um laboratório deste porte necessitará de vários equipamentos periféricos que deverão ser instalados ao seu redor. Estima-se mais de 300 m² para este fim, perfazendo um total de 1000 m².

4.3. Recursos Humanos

Com a instalação da nova máquina de 2 MV será necessário contar-se minimamente com o seguinte aumento de pessoal de apoio técnico:

- 1 Engenheiro
- 2 Operadores de Máquina
- 1 Técnico em Eletrônica
- 1 Técnico em Mecânica
- 1 Auxiliar de Mecânica

5. ESTIMATIVA DE CUSTOS

A oferta atual para o sistema de 2 MV da HVEE incluindo o equipamento básico para instrumentar 2 linhas, conforme descrito no item IV.1, é de US\$ 1,750,000.00 (um milhão, setecentos e cinquenta mil dólares). Estima-se uma despesa adicional de US\$ 450,000.00 (quatrocentos e cinquenta mil dólares) para instrumentar as outras 3 linhas com equipamento básico de vácuo e controle dos feixes e mais US\$ 500,000.00 (quinhentos mil dólares) para equipamento periférico do novo Laboratório. Usando como custo da construção US\$ 300,000.00 (trezentos mil dólares) por m², o valor total a ser investido para a implementação o projeto ACIMA é de US\$ 3,000,000.00 (três

milhões de dólares) conforme discriminado abaixo:

	US\$
1. Preço do acelerador de 2 MV instalado com a instrução das 5 (cinco) linhas de feixe	2,000,000.00
2. Equipamento periférico do Laboratório	500,000.00
3. Custo da área de 1000 m ² de construção	300,000.00
TOTAL a ser investido	3,000,000.00

O investimento já feito na aquisição do atual implantador de fons, incluindo o prédio e equipamentos

periféricos é	1,200,000.00
TOTAL estimado do projeto	4,200,000.00



Impressão e Acabamento

GRÁFICA E EDITORA FCA

com filmes fornecidos pelo editor.

**AV. HUMBERTO DE ALENCAR CASTELO BRANCO, 3972 - TEL.: 419-0200
SÃO BERNARDO DO CAMPO - CEP 09700 - SP**